

Aus dem Institut für Arbeitsphysiologie der
Technischen Universität München
Direktor: o. Prof. Dr. med. W. Müller - Limroth

MESSUNG DER MONOKULAREN AKKOMMODATIONSZEIT
DES MENSCHLICHEN AUGES MIT EINER TACHISTOSKOPISCHEN
MESSMETHODE

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
an der Ludwig Maximilians - Universität zu München

vorgelegt von
Wolfgang Schneller

München 1983

Berichterstatter: Prof.,Dr.O.E. Lund

Dekan: Prof.,Dr.W. Spann

Tag der mündlichen Prüfung: 19.1.1984

I N H A L T

	Seite
1. <u>Einführung</u>	1
2. <u>Grundlagen des Akkommodationsvorganges des Menschen</u>	4
2.1. Anatomische Grundlagen des Akkommodations- vorganges	
2.1.1. Die Linse	5
2.1.2. Der Ziliarmuskel	7
2.1.3. Der Zonulaapparat	8
2.1.4. Innervation des Akkommodationsapparates	8
2.2. Physiologische Grundlagen der Akkommodation	10
2.2.1. Der Akkommodationsmechanismus	10
2.2.2. Neurale Kontrolle der Akkommodation	15
2.2.3. Der Stimulus für die Akkommodation	17
3. <u>Frühere Messungen der Akkommodation</u>	20
4. <u>Methodik</u>	26
4.1. Die subjektive Messung der Akkommodations- zeit	26
4.2. Zur Auswahl des Testzeichens	28
4.3. Versuchsaufbau	29
4.4. Vorversuche zur Messung	32
4.5. Versuchsablauf	35
4.6. Statistische Auswertung	36

5. <u>Ergebnisse</u>	37
5.1. Akkommodationszeit in Abhängigkeit von der Testzeichengröße	37
5.2. Vergleich der Ergebnisse für die Fern - nach - Nah- und die Nah - nach - Fern - Akkommodation	47
5.3. Vergleich der monokular ermittelten Akkommodationszeiten mit binokular ge- messenen derselben Beobachter	48
5.4. Der Einfluß der Übung des Beobachters auf die Akkommodationszeit	49
5.5. Erfahrungen mit der Instrumentenmyopie	51
6. <u>Zusammenfassung der Ergebnisse</u>	52
7. <u>Diskussion der Ergebnisse</u>	54
8. <u>Zusammenfassung</u>	65
9. <u>Literatur</u>	66

1. Einführung

Eine grundlegende Information für seine Einordnung in die Umwelt gewinnt der Mensch aus der Kenntnis seiner Position in der räumlichen Umgebung. Dabei stellt er für das räumliche System durch seine Person gleichermaßen selbst den Referenzpunkt dar. Dieser bedarf jedoch der Einordnung in ein Koordinatensystem, das ihm die Einschätzung beispielsweise der Entfernung anderer Objekte im Raum ermöglicht. Neben dem Tastsinn steht dem Menschen für diese Aufgabe der Gesichtssinn im allgemeinen und die Akkommodation im besonderen zur Verfügung, wobei der Akkommodation die Aufgabe zukommt, den dioptrischen Apparat an das Sehen in die Nähe und in die Ferne anzupassen.

Die Akkommodationsbreite, also der Bereich der Brechkraftänderung durch Akkommodation, der zwischen Nahpunkt und Fernpunkt liegt, hängt vom Lebensalter ab und verringert sich mit zunehmendem Alter. Es bildet sich im Lauf der Zeit eine Alterssichtigkeit (Presbyopie) aus, die dadurch gekennzeichnet ist, daß der Kernpunkt beim alternden Menschen zwar in unendlicher Entfernung verbleibt, der Nahpunkt jedoch immer weiter vom Auge wegrückt. In jungen Jahren besteht zwar die volle Akkommodationsfähigkeit, jedoch benötigt der Akkommodationsvorgang Zeit, die dem "scharfen

Sehen" verlorengeht. Es kommt dadurch gerade in unserer technisierten Umwelt zu Problemen, die ein besonderes Interesse der Verkehrs- und Arbeitsmedizin am Vorgang der Akkommodation und insbesondere der Akkommodationszeit erklären. Gerade für den Autofahrer ergibt sich eine starke Beanspruchung der Akkommodation durch den ständig erforderlichen Blickwechsel auf Straße, Instrumententafel und Rückspiegel, die nachts durch die sinkende Lichtintensität noch weiter belastet wird. Im Berufsleben muß die Abnahme der Akkommodationsbreite hinreichend berücksichtigt werden, um die geforderten Arbeiten ausreichend genau, sicher und schnell ausführen zu können. Zwar kann durch Verwendung und Vorsatzlinsen eine Verbesserung statischer Werte (Nah- und Fernpunkt) erreicht werden, eine Vergrößerung der Akkommodationsbreite ist jedoch nicht möglich.

Die vorliegende Arbeit untersucht im Rahmen einer mehrere Altersstufen umfassenden Untersuchung die Akkommodationszeit bei 20 - 30jährigen Versuchspersonen. Die Messung wird dabei für unterschiedliche Fixationsentfernungen und unter Verwendung verschieden großer Testzeichen vorgenommen. Die Einstellung der Akkommodation auf das Fixationsobjekt erfolgt im Rahmen eines komplexen Regelmechanismus, wobei der Regler für die Akkommodation eng mit dem Regler für die Pupillenweite und mit demjenigen für die Konvergenz verknüpft ist. Um den Teilbereich der

Akkommodation möglichst unabhängig vom Einfluß der Konvergenz untersuchen zu können, verwendeten wir eine monokulare Meßmethode. Die Messungen wurden mit einem rechnergesteuerten Tachistoskop durchgeführt.

2. Grundlagen des Akkommodationsvorganges beim Menschen

2.1 Anatomische Grundlagen des Akkommodationsvorgangs

Unter Akkommodation versteht man die Fähigkeit des Sehorgans, seine Brechkraft so zu ändern, daß die zwischen Fernpunkt und Nahpunkt gelegenen Sehobjekte auf der Retina scharf abgebildet werden. Unter dem Begriff Nahpunkt versteht man dabei die kürzeste und unter Fernpunkt die weiteste Entfernung, in der ein Objekt noch scharf gesehen werden kann. Diese beiden Punkte entsprechen etwa dem Minimum bzw. dem Maximum der akkommodativen Anstrengung.

Für diese Sehaufgabe benötigt das Auge den aus Linse, Ziliarmuskel und Zonulafasern bestehenden Akkommodationsapparat.

Im Tierreich finden sich die unterschiedlichsten Akkommodationsmechanismen. So wird bei den Amphibien die Linse als Ganzes nach vorne bewegt (positive Akkommodation). Bei Reptilien und Vögeln wird die Linse von ihrem Rand her komprimiert und infolgedessen stärker gewölbt. Beim Menschen hält der Zug des gespannten Linsenaufhängungsapparates die ruhende Linse in abgeflachter Form. Durch Er-

schlaffung der Zonula nimmt die Linse als Folge ihrer Elastizität an Dicke zu und erhöht durch stärkere Krümmung ihre Brechkraft.

2.1.1 Die Linse

Die zwiebelschalenartig geschichteten Lamellen der Linse werden in Kapsel, Rinde, Embryonal- und Alterskern unterschieden, wobei es sich bei der Kapsel um eine durchsichtige, strukturlöse, elastische Membran handelt. Da sich die semipermeable Kapsel entwicklungsmäßig frühzeitig ausbildet, ist es der Linse nicht möglich, aus dem Innern der Kapsel Zellen abzustößen. Im Gegensatz zu anderen epithelialen Organen kommt es dadurch nicht zum Auftreten eines "Fließgleichgewichtes" zwischen dem Abstoßen alter Zellen und der ständigen Zellneubildung. Auf diese Weise nimmt die Linse mit steigendem Alter ständig an Größe, Dicke und Gewicht zu. Durch Änderung der Zusammensetzung der Linsenproteine und durch Nachlassen der Stoffwechselaktivität des Epithels im Alter kommt es zu einer morphologischen Umbildung im Linseninnern. Durch Verdichtung der vorhandenen Linsenfasern und durch dauernde Wasserabgabe erhöhen sich das spezifische und das absolute Gewicht. Daneben kommt es zu einer Vergrößerung des Brechungsindex gegen das Linsenzentrum hin. Das Linsenvolumen erhöht sich beispielsweise von etwa 200 mm^3 im 40. Lebensjahr auf

260 bis 270 mm³ im hohen Alter (ROHEN, 1969).

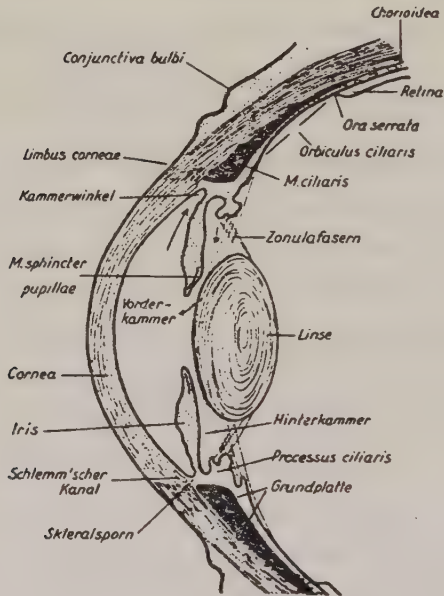


Abb. 1 Der Vorderteil des menschlichen Auges im
Schnitt: Brechende Medien (nach BARGMANN (1963))

Die Achsenlänge der Linse beträgt nach echographischen Messungen von NOVER und GROTE (1965) 3,7 mm bis 4,8 mm, der äquatoriale Durchmesser 6 mm bis 9 mm.

Diffusion aus dem Kammerwasser durch die semipermeable Linsenkapsel sorgt für die Ernährung des kapillarf freien Organs, wobei es in fortgeschrittenem Alter vergleichbar dem Sehnen- und Knorpelgewebe zu einer Abnahme der Stoffwechselaktivität auch dieser Struktur kommt.

Von der Gesamtbrechkraft des Auges entfallen von insgesamt 58 Dioptrien auf die Linse 15 Dioptrien. Die Brechkrafteinheit Dioptrie entspricht dem reziproken Wert der in Metern gemessenen Linsenbrennweite ($D \text{ (dpt)} = 1/f \text{ (m)}$).

2.1.2 Der Ziliarmuskel

Die Linse schwebt, über die radialen Zonulafasern aufgehängt, im Kammerwasser, wobei die Zonulafasern mit dem Rand des Ziliarkörpers verbunden sind. Der Ziliarkörper ring befindet sich an der Grenze zwischen Cornea und Sklera. Der dort angreifende, glatte Ziliarmuskel teilt sich in den Müller'schen Muskel mit vorwiegend ringförmigen Fasern und den Brücke'schen Muskel mit überwiegend meridional gerichteten Fasern. ROHEN (1969) wertet sie als Komponenten eines identischen, funktionellen Systems. Bei Kontraktion des Ziliarmuskels verringert sich die Distanz zwischen Linse und Muskel. Der Ziliarmuskel wird kleiner und über eine aktive Naheinstellung tritt die Akkommodation ein.

2.1.3 Der Zonulaapparat

Die ca. 80 Fasern, die im glatten Teil des Ziliarkörpers, dem sogenannten Orbicularis ciliaris, in geringer Zahl auch vom Glaskörper direkt, bzw. von den Spitzen der Ora serrata entspringen, erfüllen die Funktion einer elastischen Linsenhalterung. Die Hauptfasern zweigen sich in zwei Gruppen auf, die getrennt zur Vorder- und Hinterfläche der Linse ziehen.

2.1.4 Innervation des Akkommodationsapparates

Der Akkommodationsablauf ist in seiner nervalen Vermittlung noch nicht vollständig geklärt. Der afferente Leitungsweg entspricht anfänglich der Sehbahn und führt über den Nervus opticus und den Tractus opticus zunächst zum Corpus geniculatum laterale. Er endet schließlich im Praetectum, einer Grenzschicht zwischen Zwischen- und Mittelhirn. Eine Vielzahl von korrespondierenden Neuronensystemen läßt dem Mittelhirn eine zentrale Funktion in der Koordination von Teilfunktionen wie der Einstellung beider Augen auf den Fixationspunkt (Konvergenz) mit der Regelung der Pupillenweite (Pupillenmotorik) und der Akkommodation zukommen. Nicht zuletzt seien an dieser Stelle Einflüsse aus dem limbischen System erwähnt, dem hirnphysiologischen Substrat für die Bahnung vegetativer Einflüsse.

Der efferente Schenkel des Reflexes beginnt im kaudalen Teil des Edinger - Westphal - Kernes. Den Ziliarmuskel innervieren exzitatorisch parasympathische Fasern aus dem 3. Hirnnerven (N. ocolomotorius), die im Ganglion ciliare auf postganglionäre Fasern umgeschaltet werden. Von dort gelangen sie als Nervi brevi ciliares zusammen mit einer kleinen Zahl sympathischer Fasern aus dem Halsmark in das Auge, wo ein kleiner Teil der Fasern zusätzlich exzitatorisch den Musculus sphincter pupillae innerviert.

Maximale parasympathische Erregung und damit die Kontraktion der Ziliarmuskulatur führen zu extremer Naheinstellung. Minimale parasympathische Exzitation und maximale sympathische Erregung zu gleicher Zeit erreichen die Ferneinstellung des Auges. Die Ruhelage ist das Ergebnis von gleichzeitiger minimaler parasympathischer Erregung und minimaler sympathischer Erregung.

Parasympathische Überträgersubstanzen wie die Cholinergica Acetylcholin und Pilocarpin - um einige Beispiele zu nennen - bewirken ebenso wie die Hemmstoffe des Cholinesteraseabbaus (Physiostigmin, Prostigmin) eine Miosis (Pupillengerüststellung). Atropin als Parasympathicus-Hemmstoff führt durch eine Sphinkterlähmung an der Iris und durch Lähmung des Ziliarmuskels zur Mydriasis (Pupillenerweiterung) und

zu einer Akkommodationsschwäche in die Nähe. Diese Akkommodationsschwäche zeigt sich in der Nichtübereinstimmung von beabsichtigter und tatsächlich erfolgreicher Brechkraftänderung. Der erhöhten Gefährdung in Verkehr und Beruf sollte deshalb bei Anwendung atropinhaltiger Substanzen aus therapeutischen Gründen Rechnung getragen werden, zumal diese Akkommodationsstörung mehrere Tage anhalten kann.

2.2 Physiologische Grundlagen der Akkommodation

2.2.1 Der Akkommodationsmechanismus

Um eine optimale Abbildung eines Objekts auf der Netzhaut zu ermöglichen, ist ein komplexer Schaltkreis erforderlich, der auf wichtigen Teilfunktionen basiert. Dazu gehören die Konvergenz, die die Sehrichtungen beider Augen auf das Fixationsobjekt einstellt, die Pupillenweite, die nach dem Prinzip einer Blende den einfallenden Lichtstrom reguliert, sowie die Akkommodation als Regler der Bildschärfe. Bei der binokularen Fixation eines Gegenstands schaltet sich die Konvergenz der Augenachsen als "visueller Greifreflex" ein. Sie nimmt beim Blick von der Ferne in die Nähe zu, die Pupille wird enger gestellt. Durch eine Verringerung der Apertur kommt es über eine Ausblendung von Randstrahlen, die wegen ihrer größeren Entfernung zur optischen Achse stärker gebrochen werden, zu

einer Abschwächung der sphärischen Aberration und zu einer Verbesserung der Bildschärfe.

Zu den Ersten, die sich ausführlich mit dem Prinzip der Akkommodation beschäftigten, gehörte V. HELMHOLTZ (1909). Er ging davon aus, daß die Akkommodation im Sinne einer äußeren Akkommodation auf die Aktivität der äußeren Augenmuskeln zurückzuführen sei und die Elastizität der Linse zu ihrer Verformung führe. Die Verringerung vor allem des Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche führe zu einer Erhöhung der Linsenbrechkraft. Die Form der Hinterfläche bliebe durch den Glaskörperdruck erhalten, was bedeuten würde, daß es bei Akkommodationsänderungen auch zu Druckänderungen im Glaskörper käme. Man erhält für das Auge eine Ruhe- Brechkraft von 58 Dioptrien. Bei der Umstellung von minimaler Akkommodation (Ferneinstellung) auf maximale Akkommodation (Naheinstellung) kann die Brechkraft beim Jugendlichen um weitere 14 - 15 Dioptrien auf maximal 73 Dioptrien ansteigen. Eine Änderung von 9 Dioptrien führt dabei beispielsweise zu einer Zunahme der Linsendicke um ca. 0,4 mm.

HELMHOLTZ beobachtete an einer freien, aus dem Auge isolierten Linse, daß diese - unbeeinflußt vom Aufhängeapparat - die Tendenz hatte, eine möglichst stark gewölbte Form anzunehmen. Da diese Linsenform dem Zustand einer hohen Brechkraft entspricht, leitete V. HELMHOLTZ einen

kausalen Zusammenhang zwischen Akkommodationsfähigkeit und Linsenelastizität ab. Der elastische Linsenkörper wird durch den Zug der Zonula Zinnii, die von der zentralen Oberfläche des Ziliarkörpers zu den peripheren Arealen der Linsenkapsel verlaufen, über die Membran der Linsenkapsel in radialer Richtung gedehnt; dadurch wird die Linse abgeplattet. Bei Nachlassen der Zonulakräfte kommt es zu einer Zunahme der Wölbung von Linsenvorder- und Hinterfläche. Die Folge ist eine Zunahme der Brechkraft. Ursache für die Entspannung der Zonulafasern ist die Kontraktion des Ziliarmuskels. Die Beobachtung einer konusartigen Verformung der Linsenvorderkapsel im Bereich der Pupille führten, ebenso wie die Erkenntnis, daß V. HELMHOLTZ die mechanischen Eigenschaften der Zonulafasern zu hoch eingeschätzt hatte, zu einer Modifizierung von HELMHOLTZ's Vorstellungen. Den Grund für die Verformung sieht FINCHAM (1957) in der Tatsache, daß der vordere Linsenpol dünner als der hintere sei. Dabei beruhe die Formkonstanz der Hinterfläche vor allem auf dem Verlauf der Zonulafasern. Bereits im Ruhezustand sei sie maximal gespannt; sie sei nicht weiter dehnbar.

Da FINCHAM die Zonulafasern als wesentlichen Faktor bei der Wahrung der Form der Linsenhinterfläche betrachtet, gelangt er im Gegensatz zu V. HELMHOLTZ's Sichtweise von der Linse als einem elastischen Organ zu der Auffassung, daß diese ein plastischer Körper sei. WEALE (1963) allerdings

kommt in seiner Theorie der Presbyopie wieder zur Elastizitätstheorie zurück.

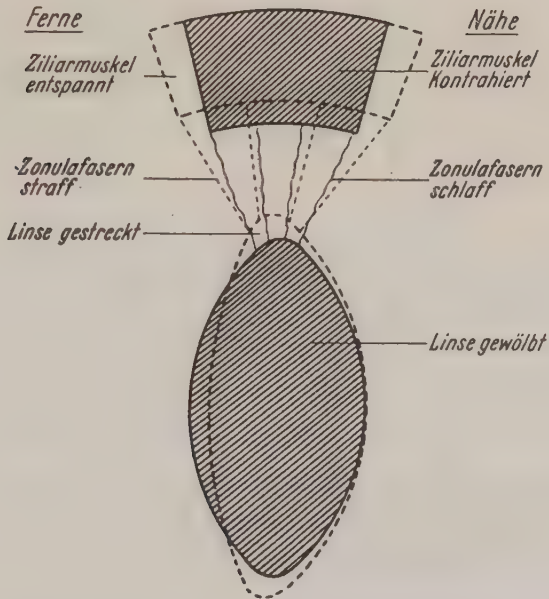


Abb. 2 Akkomodationsvorgang an Ziliarmuskel und Linse

Schraffiert: Naheinstellung
Durchgezogen: Ferneinstellung

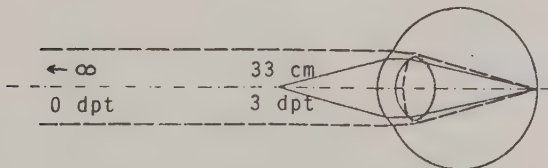


Abb 3 Strahlengang und Linsenveränderungen beim Sehen in die Nähe und in die Ferne

Das Federmodell von GULLSTRAND (1909) erklärt anschaulich den Zustand der statischen Akkommodation.

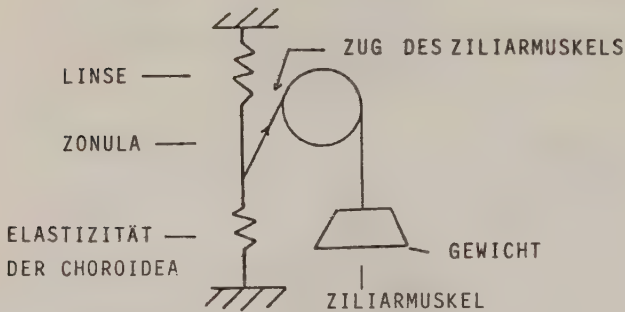


Abb. 4 Mechanisches Modell der Akkommodation
(einfache Innervation des Ziliarmuskels
durch den Parasympathicus).

Die elastischen Kräfte von Choroidea und Linse sind als Federn dargestellt, die gegeneinander wirken. Der Ziliarmuskel wirkt als dritter Partner auf das Gleichgewicht ein. Insgesamt kommt es bei der äußeren Akkommodation nach BRÜCKNER (1963):

1. Zu einer Änderung der Linsenkrümmung
2. Zum Vorrücken des vorderen Linsenpols
3. Zu einer axialen Linsenverschiebung,
wobei diese unbedeutend ist.

Daneben existiert die sogenannte "innere Akkommodation". Sie macht nach GULLSTRAND etwa ein Drittel des Zuwachses an Brechkraft aus und ist das Ergebnis einer Verschiebung stärker brechender Massen von der Peripherie zur Linsenmitte hin. Die von FINCHAM (1957) beschriebene konusartige Verformung (Lenticonus anterior) trägt in diesem Zusammenhang zusätzlich zu einer Veränderung der Brechkraft bei.

2.2.2 Neurale Kontrolle der Akkommodation

Abweichend von der Ansicht V. HELMHOLTZ's, daß der Ziliarmuskel bei der Akkommodation nur vom Parasympathicus innerviert würde, führte die Entdeckung, daß die Linse in der Akkommodationsruhelage nicht auf den Fernpunkt akkommodiert ist, zu der Überzeugung, daß eine Doppelinnervation durch Parasympathicus und Sympathicus vorliegen müsse. MORGAN (1957) nimmt für die Akkommodationsruhelage eine Entfernung von ca. 1 m an und postuliert für diese Beobachtung sowohl eine negative als auch eine positive Akkommodation. PITTS (1968) bringt den Gedanken einer zentralen Kontrolle über eine aktive negative Akkommodation ins Spiel und findet bei seinen weiteren Untersuchungen bei Katzen sowohl eine positive wie auch eine negative Akkommodation auf eine Stimulation des Hirnstammes hin. COGAN (1937) schloß aus den von ihm ermittelten Versuchsergebnissen, die kürzere

Akkommodationszeiten für die Nah- nach- Fern- Akkommodation ergaben, auf das Vorhandensein einer Innervation zusätzlich zum Parasympathicus, der allein durch passive Akkommodation keine ausreichend schnelle Nah- nach- Fern- Akkommodation gewährleisten könne. TOATES (1972) bietet als Resümee seiner Erkenntnisse über die Innervation ein mechanisches Modell an, mit dem er das Modell GULLSTAND's ergänzt.

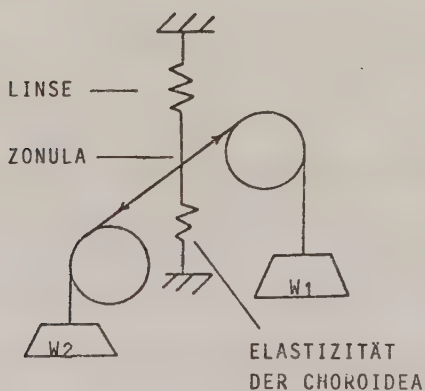


Abb. 5 Modell der Akkommodation bei zweifacher Innervation
(Sympathicus und Parasympathicus)

Dabei ziehen zwei Gewichte in verschiedene Richtungen, wobei Gewicht W_1 den Einfluß des Parasympathicus und W_2 den des Sympathicus symbolisieren soll. Die Akkommodationsruhe- lage wird bei dieser Darstellungweise durch ein Gleichge-

wicht beider einwirkenden Kräfte gekennzeichnet.

Pharmakologische und anatomische Untersuchungen unterstützen das Postulat eines Sympathicuseinflusses. Damit wäre auch der Einfluss von psychischen Stimmungen, wie Angst und Ärger auf die Akkommodation zu erklären, wie COGAN (1937) und OLMSTEAD (1944) sie in ihren Untersuchungen fanden. Sowohl Examensbelastung als auch diverse akustische Reize und Stromstöße vermochten dabei die Nahakkommodation zu behindern. Ähnlich dem Tremor der Skelettmuskulatur ist auch der Ziliarkörper jederzeit durch Einwirkung beider Nervensysteme oszillatorischen Schwankungen und Spannungsänderungen unterworfen (CAMPBELL, 1959). Nach TOATES (1972) liegt der Grund für die jahrelange Verkenntung des Sympathicuseinflusses auf die Akkommodation vor allem in der Tatsache, daß die durch den Sympathicus bewirkte Akkommodation einen geringeren dioptrisch meßbaren Grad erreicht, als jene, die auf den Einfluß des Parasympathicus zurückgeht.

2.2.3 Der Stimulus für die Akkommodation

Beim beidäugigen (binokularen) Sehen kommt es gewöhnlich zu einer "Fusion" zweier "einzeläugiger" Bilder. Voraussetzung dafür ist die Abbildung des Sehobjektes auf "korrespondierenden" Netzhautpunkten, d.h. sich in der Sehrichtung entsprechenden Rezeptorarealen beider Augen.

Ist dies nicht der Fall, so kommt es durch Abbildung auf disparaten (sich nicht entsprechenden) Netzhautabschnitten zu Doppelbildern. Die disparate Abbildung von Sehobjekten im Bereich einer horizontalen Ebene auf der Netzhaut wird als Querdisparation bezeichnet.

Das Entstehen von Doppelbildern wird sowohl durch die geringe Sehschärfe der Netzhautperipherie als auch durch einen binokularen Hemmungsmechanismus im zentralen visuellen System unterdrückt; dabei kommt es bei binokularer Betrachtung zweier Objekte zu einem binokularen Wettstreit, der zu einer zeitlich abwechselnden Wahrnehmung führt.

Störende Doppelbilder werden also nicht wahrgenommen, sondern vom optischen Sensorium direkt zum räumlichen Eindruck verschmolzen. Dabei ist die Wahrnehmung räumlicher Nähe das Ergebnis der bitemporalen Querdisparation, die Fernwahrnehmung Folge der binasalen Querdisparation. Als Maßstab für die Einschätzung der Objektentfernung dient der Grad der Querdisparation. Aufgrund dieser Funktion wurde der Querdisparation in vielen Arbeiten die Hauptrolle beim Zustandekommen räumlichen Sehens zuerkannt. Bei Änderung der Fixationsrichtung dient sie als Vergenzreiz; sie ist der Auslöser der binokularen Akkommodation.

ITTELSON und AMES (1950) vermuteten in einer illusorischen Entfernungsänderung infolge einer Änderung der Objektgröße einen Reiz für die Akkommodation. Weitere Reize stellen die Unschärfe des Fixationsobjektes (FINCHAM, 1951),

die chromatische (IVANOFF, 1949) und die sphärische Aberration (FINCHAM, 1951).

Die chromatische Aberration entsteht dadurch, daß ein parallel einfallendes Strahlenbündel weißen Lichts beim Auftreffen auf die Linse und die anderen brechenden Medien des Auges in unterschiedlichen Winkeln gebrochen wird. Da kurzwellige Strahlen stärker gebrochen werden als langwellige, kommt es um eine punktförmige Abbildung auf der Netzhaut herum zu einem Zerstreungskreis von farbigem Licht.

Die sphärische Aberration entsteht durch Strahlen, die weiter entfernt von der optischen Achse durch die Pupille dringen. Die stärkere Brechung der Randstrahlen verursacht auf der Netzhaut auch bei scharfer Abbildung einen Zerstreungskreis des Lichts, wodurch die Ränder der Abbildungen nie ganz scharf werden.

Auf diese Abbildungsunschärfe reagiert die Akkommodation nach Ansicht verschiedener Autoren in Art eines "Versuch- und - Irrtum" - Verhaltens, also mit Akkommodationsbewegungen in die Ferne und die Nähe (TROELSTRA, 1949). Die Sicherheit des Auges, in die richtige Richtung zu akkommodieren, wird in den bisher vorliegenden Arbeiten sehr unterschiedlich eingeschätzt. ALLEN (1956) findet bei 20 von 22 Versuchspersonen eine Akkommodation in die richtige Richtung. TROELSTRA fand immerhin bei 50 % seiner Probanden eine Akkommodation in die falsche Richtung.

3. Frühere Messungen der Akkommodationszeit

Seit den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts sind uns Messungen der Akkommodationszeit bekannt. Die meisten dieser Untersuchungen verwenden dabei - wie auch bei der vorliegenden Arbeit - subjektive Meßverfahren. Die gemessene subjektive Zeit setzt sich zusammen aus Erkennungszeit, sowie Latenz- und Akkommodationszeit. Um den Einfluß von Konvergenz- und Blickbewegungen auszuschalten, wurden diese meist monokular durchgeführt. Allerdings bleibt auch bei Ausschalten der binokularen Konvergenz eine geringe akkommodative Konvergenz bestehen. Im folgenden seien die wichtigsten Arbeiten kurz dargestellt:

VOLKMANN (1846) beschäftigte sich als Erster mit dieser Thematik. Für eine Akkommodation zwischen Entfernungen von ca. 6 dpt (ca. 16 cm) und 3,5 dpt (ca. 28 cm) erhielt er eine Akkommodationsgeschwindigkeit von 1,5 sec für die Akkommodation in beide Richtungen. Als Akkommodationsreize dienten ihm hierfür zwei Nadelspitzen, die die Versuchsperson fixieren mußte. Aus der größtmöglichen Akkommodationsfrequenz zwischen den beiden Sichtobjekten pro Minute ermittelte er die Akkommodationszeit. Dabei hatten die Testpersonen die Aufgabe, vermittels einer Scheiner'schen Doppelblende auf die Retina projizierte Doppelbilder zur Deckung zu bringen (Abb. 6)

Wird auf eine Nadelspitze akkommodiert, die sich innerhalb

der Akkommodationsstrecke befindet, dann wird das Fixationsobjekt mit Hilfe der Akkommodationskraft einfach gesehen. Liegt die Nadelspitze näher am Auge als der Nahpunkt, so wird sie auch bei maximaler Nahakkommodation doppelt gesehen. Zur Bestimmung des Nahpunktes wird die Nadel so weit an das Auge herangeführt, bis sie auch bei maximaler Nahakkommodation nicht mehr einfach wahrgenommen werden kann. Zur Ermittlung des Fernpunktes ist die Vorschaltung einer Positiv-Linse notwendig. Die Nadel wird vom Auge weg bewegt. Der Fernpunkt ist dann erreicht, wenn das Auge auf Unendlich " ∞ " akkommodiert (Parallelstrahlen, Abb. 6b) und die Nadelspitze wiederum einfach gesehen wird. Jenseits des Fernpunktes wird die Nadelspitze doppelt gesehen. Zwar bietet das Kriterium "einfach oder doppelt"-Sehen eine gute Kontrolle über die richtige Fokussierung, die Akkommodationszeit kann jedoch mit diesem einfachen Scheiner-Versuch allenfalls mit der Stoppuhr-Methode gemessen werden.

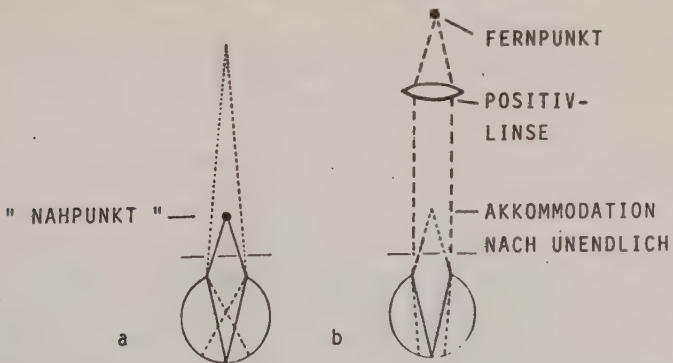


Abb. 6 Scheiner - Versuch: a. Naheinstellung b. Ferneinstellung

Im Jahre 1857 unternahm VIERRORDT weitere Untersuchungen zur Erforschung der Akkommodationszeit. Dabei akkommodierte er zwischen einem horizontal gespannten Papierstreifen, der sich in einer Entfernung von 18 m (0,055 dpt) befand und einem vertikal gespannten Seidenfaden, der in verschiedenen Abständen zum Auge bewegt werden konnte. Die Zeit wurde dabei mit einer Stoppuhr gemessen. Da bei dieser Vorgehensweise die Reaktionszeit mit in die Akkommodationszeit eingehen mußte, ermittelte VIERRORDT die Zeit für eine mehrmalige Akkommodation zwischen beiden Fixationsobjekten und subtrahierte sie von der Summe der ermittelten Einzelzeiten. VIERRORDT erkannte bei seinem Versuch die Bedeutung des Einflusses, den die Übung der Versuchspersonen auf das Ergebnis eines solchen Versuchs hat.

Für die Akkommodation von Fern auf Nah ergaben sich Zeiten, die zwischen 0,20 sec bei 65 cm (1,54 dpt) Nahpunktentfernung und 1,185 sec bei 10 cm (10 dpt) Nahpunktentfernung lagen. In Gegenrichtung fanden sich Zeiten von 0,204 sec bei 65 cm und 0,832 sec bei 10 cm.

Um es der Versuchsperson zu ermöglichen, auf dasselbe Objekt in Nähe und Ferne zu akkommodieren, verwendete BARRETT (1885) eine Linse, die zwischen dem Auge der Versuchsperson und dem naheliegenden Fixationsgegenstand in den Strahlengang eingebracht werden konnte und dasselbe Objekt im Unendlichen abbildete. Damit gelang es ihm, eine Änderung der Blickrichtung während der Akkommodation auszuschalten.

Die umfangreichste Untersuchung über die Akkommodationszeit veröffentlichte GRÖNHOLM (1910). Mit Hilfe einer aufwendigen Konstruktion mußten die Versuchspersonen dünne, beleuchtete Spalte mit deren Spiegelbild, das in die gleiche Fixationsrichtung projiziert wurde, zur Deckung bringen. Eine Scheiner'sche Doppelblende vor der Pupille der Versuchsperson ermöglichte die Entscheidung über das Eintreten der Akkommodation. Bei Nichterreichen der Akkommodation wurde das fixierte Objekt doppelt gesehen. Bei seinen Messungen fand GRÖNHOLM eine längere Zeit für die Akkommodation von Nah auf Fern als in die umgekehrte Richtung. Dabei kommt es nach seiner Erfahrung allerdings zu beträchtlichen Unterschieden hinsichtlich der Akkommodationszeit. GRÖNHOLM ermittelte bei Messungen bei 9 Versuchspersonen in jeweils 30 bis 50 Einzelversuchen folgende Mittelwerte:

Nahpunkt (dpt)	3	4	5	6
Einstellzeit (s) von 0 dpt auf Nahp.	0,56	0,80	0,91	1,55
Einstellzeit (s) von Nahp. auf 0 dpt	0,87	1,31	1,15	0,99

Den Grund für die unterschiedlichen Akkommodationszeiten für Nah- und Fernakkommodation sieht GRÖNHOLM in der Unterschiedlichkeit der einwirkenden elastischen Kräfte. So käme die langsamere Fern - Nah - Akkommodation durch eine langsamere Kontraktion des Ziliarmuskels zustande, der durch den elastischen Widerstand der Choroidea beeinflußt würde.

ALLEN (1956) verwendete bei seinen ebenfalls monokularen Versuchen das Optometerprinzip, das es möglich machte, das Testzeichen bei allen Entfernungen unter demselben Sehwinkel zu betrachten. Dabei wurden Testzeichen verwendet, die den Optotypen der Snellen'schen Prüftafel entsprachen.

Es handelt sich dabei um den Pflüger'schen E - Haken und um den Landoltring, bei denen der Balkenabstand bzw. die Ringöffnung in 5 m Prüferentfernung dem Sehwinkel einer Bogenminute, d. h. ca. der doppelten Breite eines Zapfens entsprechen. Dabei werden zwei Zapfen und ein dazwischensliegender belichtet.

Eine Sammellinse wurde so vor dem Auge angebracht, daß ihr bildseitiger Brennpunkt in der Augenpupille lag. So war es möglich, durch Verschieben des Testzeichens vor der Sammellinse dem Beobachter unterschiedliche Akkommodationsreize anzubieten. Durch seine Beobachtungen erhielt ALLEN Aufschluß über das Akkommodationsverhalten unterschiedlicher Altersgruppen; er fand heraus, daß jüngere Versuchsteilnehmer sowohl bei Fern- als auch bei Nahakkommodation kürzere Akkommodationszeiten erreichten als ältere Probanden.

MIZUKAWA, NAKABAYASHI, MANABE und KATANO (1963) benutzten ein Gerät, das sie selbst zur Diagnostik von Akkommodationsstörungen für eine klinische Verwendung konstruiert hatten. Die Darbietungszeit des Testzeichens wurde dabei erstmals vom Testleiter vorgegeben, um ein Einfließen der

motorischen Reaktionszeit in die Akkommodationszeitmessung zu umgehen. Die Testzeichen wurden dem Beobachter mit Hilfe eines Strahlteilerprismas zeitlich nacheinander präsentiert. Dazu wurde die Beleuchtung der zwei Strahlengänge mit jeweils einem Testzeichen in unterschiedlicher Entfernung wechselweise ein- und ausgeschaltet. Der Sehwinkel wurde in jeder Entfernung konstant gehalten. Bei der Bestimmung der Akkommodationszeit wählten die Autoren die Akkommodationsruhelage als Bezugspunkt. Von diesem Bezugspunkt aus mußten die Versuchsteilnehmer auf näher - oder

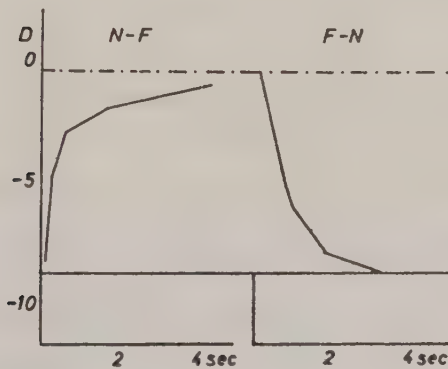


Abb. 7 Beispiel für eine von NAKABAYASHI ermittelte monokulare Akkommodationskurve

weiterentfernt gelegene Objekte bis an die Grenze ihres Akkommodationsbereiches akkommodieren.

Bei den so ermittelten Akkommodationskurven - in Form von - Dioptrien - Zeit - Diagrammen - fand MIZUKAWA et al. für die Nah - Fern - Akkommodation bezüglich der ersten Hälfte des Akkommodationsbereiches steil ansteigende, dann, im zweiten Abschnitt zunehmend abflachende Kurven. Die Verzögerung vor Erreichen des Fernpunktes war geringer als diejenige, die bei der Fern - nach - Nah - Akkommodation vor Erreichen des Nahpunktes gefunden wurde (Abb. 7).

4. Methodik

4.1 Die subjektive Messung der Akkommodationszeit

Das dynamische Akkommodationsverhalten des Auges läßt sich mit objektiven und subjektiven Verfahren untersuchen, wobei die subjektiven Methoden den Akkommodationserfolg nach dem subjektiven Erkennen bzw. Nichterkennen eines Testzeichens bewerten, während die objektiven Techniken kontinuierlich den zeitlichen Ablauf der Akkommodation untersuchen.

Im Gegensatz zu früheren subjektiven Messungen, bei denen die Versuchspersonen eine Stoppuhr benutzten, um den zeitlichen Ablauf des Akkommodationswechsels festzuhalten, ver-

wenden die Autoren neuerer Arbeiten alle tachistoskopische Methoden. Grundsätzlich hat die Testperson bei diesem Verfahren die Aufgabe, von einem Testzeichen, das zunächst in einer Ausgangsposition dargeboten wird, auf ein Testzeichen in veränderter Entfernung zu akkommodieren. Die Messung wird dabei monokular durchgeführt, um den Einfluß der Konvergenz auszuschalten.

Die Versuchsperson fixierte das Testzeichen in einer vorgegebenen Entfernung. Unter gleichzeitiger Drehung wurde das Testbild in eine neue Entfernung verschoben. In dieser neuen Position war das Testzeichen allerdings nur während einer kurzen, vom Experimentator bestimmten Zeit für die Versuchsperson erkennbar. Ausgehend von Zeiten, die unterhalb der Wahrnehmungsschwelle lagen, wurden durch mehrmaliges Wiederholen dieses Versuchsablaufs zunehmend längere Darbietungszeiten angeboten, bis hin zu einer Zeit, die für das Erkennen des Testzeichens ausreichte und darüberhinaus.

Um die Auswahl der Testzeichenstellung durch den Versuchsleiter zufällig zu treffen, wurde die Testzeichenstellung vor jeder Darbietung mit einem Zufallszahlengenerator ermittelt. Für das Erkennen des Testzeichens läßt sich auf diese Weise eine kürzeste, endliche Zeit ermitteln, in der die Latenzzeit - das ist diejenige Zeit, die bis zum Eintritt der Akkommodationsänderung vergeht - sowie die eigentliche Akkommodationszeit und die Erkennungszeit enthalten sind.

Diese kürzeste Zeit, innerhalb der ein Testzeichen erkannt

werden kann, gilt hier definitionsgemäß als Akkommodationszeit. Ein Darbieten des Testzeichens mit zu kurzen Darbietungszeiten bis hin zu gerade ausreichenden und von sicher für die Akkommodation ausreichenden Zeiten bis hinunter zu Zeiten, bei denen ein Erkennen der Endstellung nicht mehr möglich ist, wird als Sukzessivverfahren bezeichnet. Dabei sind die in beiden Meßabläufen ermittelten Erkennungszeiten gleich lang und ergeben für diese konkrete Testzeichenentfernungsdifferenz die Akkommodationszeit.

4.2 Zur Auswahl des Testzeichens

Als Testzeichen wurde ein Landoltring verwendet.

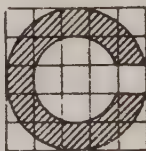


Abb. 8 Landoltring

Da die Konstanz der Sehschärfeanforderung gewahrt werden mußte, wurde die Versuchsanordnung so gestaltet, daß das Testzeichen stets unter demselben Sehwinkel erschien.

Bei den Messungen wurden Testzeichen verwendet, die um den Faktor 1,2 größer waren, als die in der entsprechenden Entfernung gerade noch erkennbaren. Damit wurde erreicht, daß die Erkennungszeiten gegenüber den Akkommodationszeiten verhältnismäßig klein gehalten werden können. Ein Nichterkennen des Testzeichens geht dabei auf eine ungenügende Akkommodation

und nicht auf eine ungenügende Sehschärfe zurück.

4.3 Versuchsaufbau

Wir verwendeten ein rechnergesteuertes Tachistoskop nach dem von MIZUKAWA, NAKABAYASHI, MANABE und KATANO (1963) zur Untersuchung von Akkommodationsstörungen entwickelten Verfahren, wobei unser Gerät jedoch nur einen Strahlengang und ein Testzeichen für alle Entfernungen aufweist.

Mit diesem Meßgerät können sowohl statische als auch dynamische Akkommodationswerte gemessen werden.

Hierzu blickte die Testperson, deren Kopf mittels einer Kinn- und Stirnstütze in seiner Haltung fixiert war und deren nicht beobachtendes Auge abgedeckt war, in das Okular des Tachistoskops (Abb. 9). Der Blick erfolgte zunächst über eine im Okular befindliche Korrekturlinse, die Optometerlinse, auf einen verschiebbaren Rechtwinkelspiegel. Über diesen Spiegel konnte die Entfernung Testzeichen - Optometerlinse im Sehbereich zwischen +4 dpt (hyperop) und -9 dpt (myop) in der Nähe eingestellt werden. Vom Rechtwinkelspiegel führte der Strahlengang über einen Umlenkspiegel zu einer drehbaren Fassung, die das auswechselbare Testzeichen hielt. Die Beleuchtung des Testzeichens konnte über einen elektromechanischen Verschuß für bestimmte Zeiten gesteuert werden; Leuchtdichte und Farbe konnten durch Filter verändert werden.

Die bei unseren Messungen benutzten Landoltringe hatten eine Visusanforderung von 0,6 und 0,7, was einem Sehwinkel von 1,6 min bzw. 1,4 min entspricht. Als Normwert der Sehschärfe gilt der Sehwinkel von einer Bogenminute ($1' = 60''$). Der Visus 1 wird erreicht, wenn das normierte Sehzeichen (Landoltring oder Pflügerhaken) bei einer Darbietung unter dem Sehwinkel von $1'$ richtig erkannt wird.

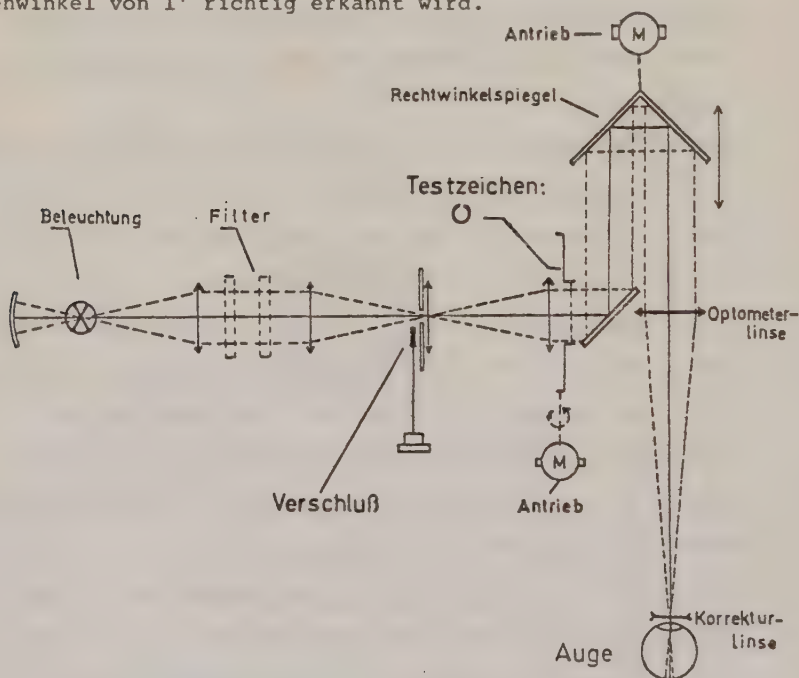


Abb. 9 Rechnergesteuertes Tachistoskop zur Messung
der Akkommodationszeit nach J. Zülch und
H. Krueger

Für die reelle Darbietung des Testzeichens im Fernpunkt (ca. 6 m) wären räumlich sehr große Meßanordnungen nötig. Durch Anwendung des Optometerprinzips (Abb. 10) und einer Brennweite der Optometerlinse von 100 mm ist es jedoch möglich, eine Akkommodationslage 0 dpt (Fernpunkt) in einem tatsächlichen räumlichen Abstand von ca. 20 cm vom Auge zu erreichen.

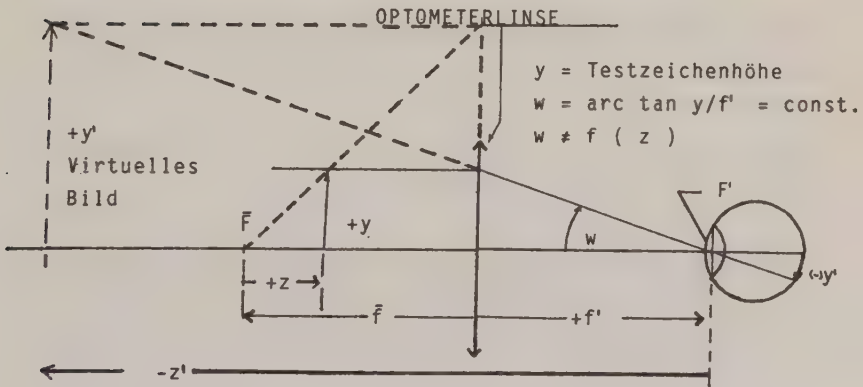


Abb. 10 Optometerprinzip

Das Optometerprinzip ermöglicht auf engem Raum - unter Konstanthaltung des Seh winkels - eine Darbietung von Sehzeichen in verschiedenen Akkommodationslagen. Das Sehobjekt (+y) steht dabei zwischen Optometerlinse und objektseitigem Brennpunkt

($\bar{F}$) und erscheint vom Punkt F' (vorderer Hauptpunkt des Auges) aus gesehen, immer unter dem gleichen Sehwinkel (w). Zwischen dem Abstand ($-\bar{f}$) des Testzeichens von der Optometerlinse und der in Dioptrien gemessenen Entfernung ($+z$) vom gegenstandsseitigen Brennpunkt ($\bar{F}$) findet sich eine lineare Beziehung.

$$\frac{y'}{y} = \frac{\bar{f}}{z}$$

Der Betrachter sieht ein virtuelles Bild des Testzeichens.

4.4 Vorversuche zur Messung

Vor der Durchführung der Messung wurden die Versuchspersonen mit der Aufgabenstellung vertraut gemacht. Die Probanden, die für den Versuch herangezogen wurden bzw. als geeignet angesehen wurden, wurden vorher schon der Prüfung einiger Auswahlkriterien unterzogen. Es wurden grundsätzlich nur solche Personen in das Testkollektiv aufgenommen, deren Fehlsichtigkeit -1 dpt nicht überstieg.

Im Einzelnen wurden während der Vorversuche folgende Messungen vorgenommen:

1. Überprüfung des Visus:

Auf einer Snellen'schen Optotypentafel mußten Lesezeichen entsprechend Visus 1 mon- und binokular erkannt werden.

2. Messung des maximalen Nahpunkts auf dem Donders- Optometer:

Die Versuchsperson sieht durch eine Scheiner'sche Doppellochblende zwei helle, sich überschneidende Kreisflächen. Es sind unscharfe Bilder der Lochblenden. In der Überschneidungsfläche muß eine, auf der Millimeterskala verschiebbare Nadel monokular fixiert werden. Nur wenn auf die Nadelspitze akkommodiert wird, kann ein Einfachbild gesehen werden. Sobald die Nadel in Bereiche außerhalb des individuellen Akkommodationsbereiches bewegt wird, stellt sich ein Doppelbild ein.

3. Prüfung des Nahvisus mit dem Nahprüfgerät "Oculus":

Die Prüfung erfolgt mit einer Optotypentafel, die aus einer Entfernung von 50 cm richtig gelesen werden mußte.

In einem Übungsversuch am Tachistoskop wurde den Probanden die Aufgabe gestellt, bei kleinen Entfernungsstufen und langen Darbietungszeiten zu akkommodieren. Beispielsweise mußte das Testzeichen nach einem Sprung von 0 dpt auf - 1 dpt während einer Darbietungszeit von 5 sec erkannt werden. Den Probanden wurden dabei alle vier möglichen Testzeichenstellungen vorgeführt, die über einen Kreuzschalter zur Gerätesteuerung

gemeldet werden mußten.



Abb. 11 Beispiele für die Testzeichenstellungen

Durch ein optisches Signal, das in die Versuchssteueranlage integriert war, war es dem Versuchsleiter möglich, die subjektive Entscheidung der Versuchsperson zu verfolgen. Den Probanden wurde dabei eingeschärft, möglichst wenig zu raten und sich für eine Testzeichenstellung zu entscheiden. Nur für den Fall, daß keine Stellung erkannt werden konnte, sollte die "Nicht - erkannt" - Taste gedrückt werden. Lag der, bei dem Probanden gemessene Fernpunkt beispielsweise $-0,8$ dpt, so wurde auf eine entsprechende Korrekturlinse verzichtet. Dieser Wert wurde bei dem zu messenden Entfernungssprung mathematisch berücksichtigt; anstelle eines Entfernungssprunges von 0 dpt nach $-2,5$ dpt wurde also ein Sprung von $-0,8$ dpt nach $-3,3$ dpt gemessen. Durch den Verzicht auf vorgeschaltete Korrekturgläser war es möglich, zusätzliche Abbildungsfehler durch sphärische bzw. chromatische Aberration auszuschalten.

4.5 Versuchsablauf

Das Testzeichen wurde zunächst in einer der vier möglichen Stellungen in der Fernpunktlage 0 dpt so lange dargeboten, bis der Proband sicher auf das Testzeichen akkommodiert hatte. Nach einem kurzzeitigen Blendenschluß ("Dunkelblitz") wurde das Testzeichen für 0,3 sec noch einmal in derselben Entfernung, jedoch in einer Kontrollstellung dargeboten. Mit dem Anbieten dieses Akkommodationsreizes sollte ein Vorausakkommodieren, d.h. eine aktive Akkommodationsbewegung und damit eine Beeinflussung der Akkommodationsstrecke und der Akkommodationszeit verhindert werden. Das Anbieten der Testzeichenstellungen wurde mit einem Tonsignal verknüpft. Durch das Verwenden des "Dunkelblitzes" wurde während des Motorlaufs das Erkennen der Drehrichtung und der Verschiebewegung des Testzeichens verhindert. Nach Darbietung der Kontrollstellung erschien das Testzeichen dann kurzzeitig in einer neuen, durch das Meßprogramm definierten Entfernung. Die Darbietungszeit für diese Entfernung wurde nach und nach verkürzt und näherte sich von, für das Erkennen der Stellung ausreichenden Zeiten schrittweise in Stufen von 0,1 sec hin zu einem Grenzbereich, in dem die Zeit gerade noch zum Erkennen ausreichte. Wenn sich die Darbietungszeit der Akkommodationszeit näherte, wurde das richtige Erkennen des Testzeichens zunehmend unsicher. Läßt man die Ratewahrscheinlichkeit unberücksichtigt, so kann

man annehmen, daß in diesem Grenzbereich 50 % der Antworten falsch sein werden bzw. das Testzeichen nicht erkannt wird. Bei einer weiteren Verkürzung der Darbietungszeit ist mit einem weiteren Anstieg der Fehlerquote zu rechnen. Für jede Darbietungszeitstufe wurden 10 Messungen durchgeführt.

4.6 Statistische Auswertung

Da die Akkommodation, wie alle biologischen Phänomene sowohl innerhalb der Versuchsperson (intraindividuell) als auch im Versuchspersonenkollektiv (interindividuell) Schwankungen unterworfen ist, muß eine ausreichend große Zahl von Darbietungen durchgeführt werden, um eine ausreichende Genauigkeit der gemessenen Akkommodationszeit zu erreichen.

Wenn man davon ausgeht, daß das Sehzeichen dann nicht erkannt wird, wenn die Akkommodationszeit die Darbietungszeit übertrifft und andererseits erkannt wird, wenn die Darbietungszeit länger wird als die Akkommodationszeit, dann müßte man damit rechnen, daß sich bei einer mehrfachen Messung desselben Akkommodationssprunges unterschiedliche Akkommodationszeiten finden. Man würde dann eine Verteilung der gemessenen Akkommodationszeitwerte um einen Mittelwert herum erhalten. Diese Verteilung wird sich bei einer größeren Zahl von durchgeführten Messungen an eine Normalverteilung annähern,

wenn die Abweichung statistisch bedingt ist.

In dem von uns verwendeten Diagramm ist die jeweilige Erkennungsrate (%) gegen die Darbietungszeit t_D aufgetragen. Wir erhalten eine Summenkurve, auf der bei diskreten Parametern für jeden Wert des Parameters die Häufigkeitsverteilung aufgetragen ist. Der Schnittpunkt der Kurve mit der durch den Ordinatenpunkt 50 % gezogenen Geraden, der 50 % - Erkennungslinie, entspricht demnach dem Mittelwert der Gauss'schen Normalverteilung.

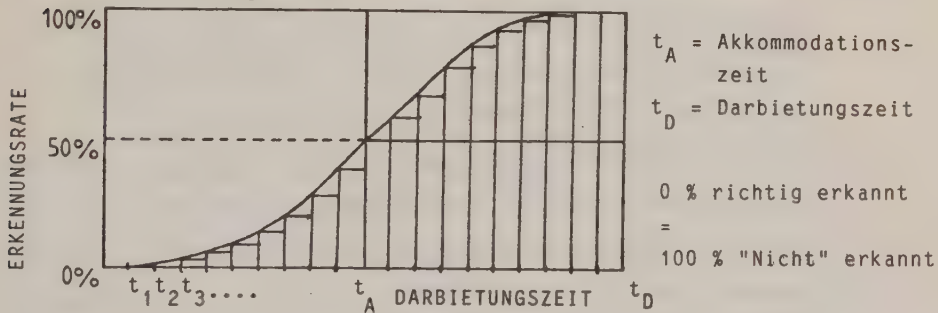


Abb. 12 Verlauf der Erkennungsrate

5. Ergebnisse:

5.1 Akkommodationszeit in Abhängigkeit von der Testzeichengröße

Die Abbildungen 13 - 18 zeigen Einzelbeispiele von Kurvenverläufen als Ergebnis von Messungen, die an einem Testpersonenkollektiv von insgesamt 30 Personen beiderlei Geschlechts im

Alter von 20 - 30 Jahren durchgeführt wurden.

Der Verlauf der Erkennungsrate wurde auf einem Erkennungsrate-Zeit - Diagramm protokolliert; wir gehen dabei von der Überlegung aus, daß die Darbietungszeit in einem Übergangsbereich, der in der Nähe der 50 % - Erkennungsrate liegt, etwa der Akkommodationszeit entspricht. Man kann über der auf der Abszisse aufgetragenen jeweiligen Darbietungszeit die entsprechende, auf der Ordinate aufgetragene Erkennungsrate ablesen. Eine Erkennungsrate von 100 % entspricht dabei dem Erkennen aller dargebotenen Testzeichen pro Darbietungszeitstufe. Bei 50 % sind von der Versuchsperson 50 % der Antworten richtig und die übrigen zu 50 % falsch bzw. "nicht erkannt".

Der Schnittpunkt der Kurve mit dem 50 % - Wert der Erkennungsrate gibt die jeweilige Akkommodationszeit auf der Abszisse an. In den Diagrammen erscheinen sowohl die Kurven für die Akkommodation von Nah nach Fern (durchgezogene Linie) als auch diejenigen für die Akkommodation von Fern nach Nah (gestrichelte Linie).

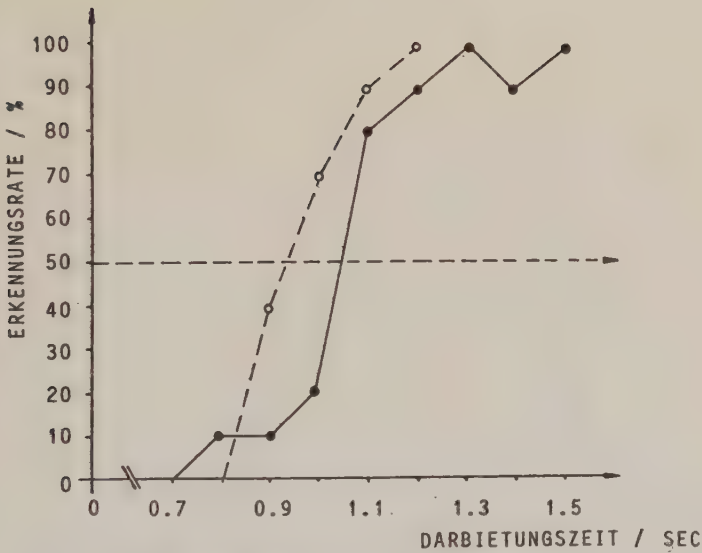


Abb. 13 Verlauf der Erkennungsrate für einen Sprung von 0 dpt nach - 3,3 dpt (---) und zurück (—) (Visusanforderung 0.6)

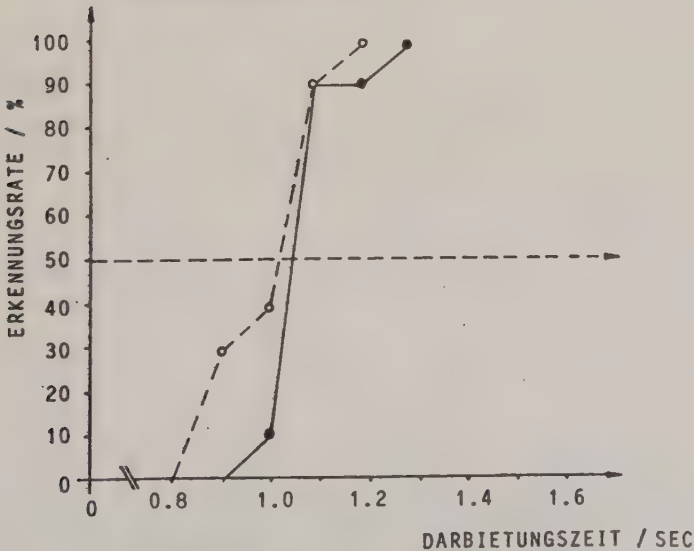


Abb. 14 Verlauf der Erkennungsrate für einen Sprung von 0 dpt nach - 3,3 dpt (---) und zurück (—) (VA 0.6)

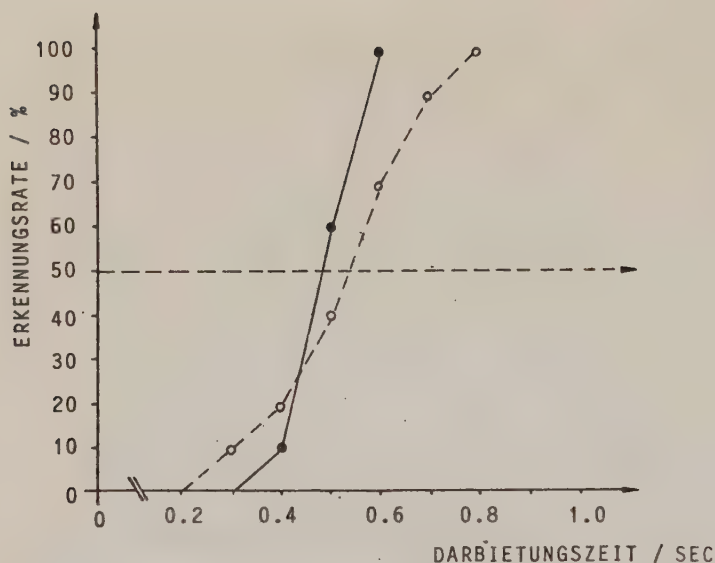


Abb. 15 Verlauf der Erkennungsrate für einen Sprung von 0 dpt nach - 3,3 dpt (—) und zurück (VA 0.6)

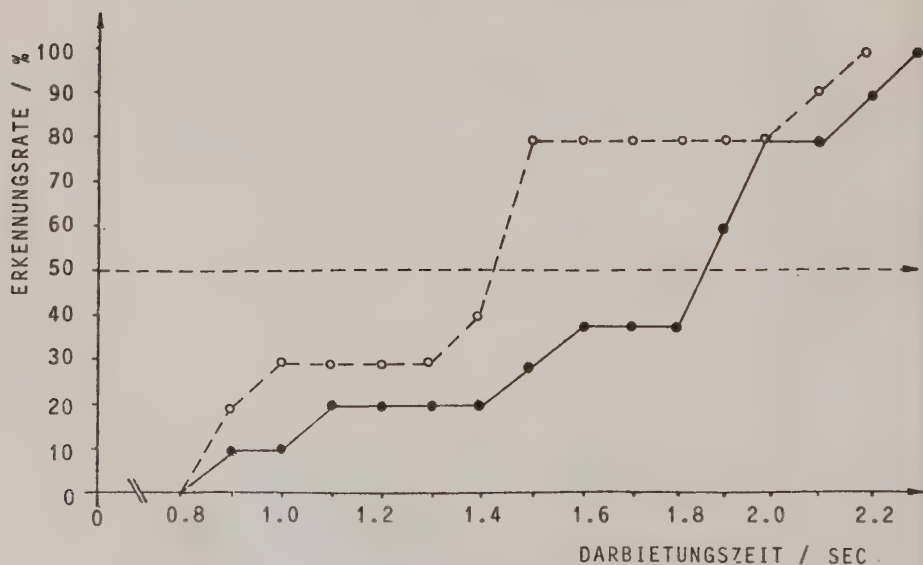


Abb. 16 Verlauf der Erkennungsrate für einen Sprung von 0 dpt nach 3,3 dpt (—) und zurück. (VA 0.7)

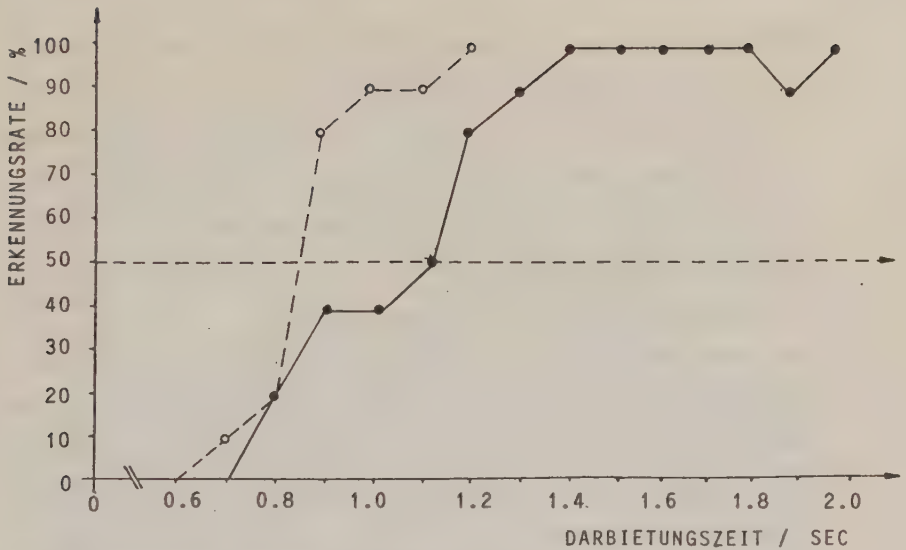


Abb. 17 Verlauf der Erkennungsrate für einen Sprung von 0 dpt nach -3,3 dpt (—) und zurück. (VA 0.6)

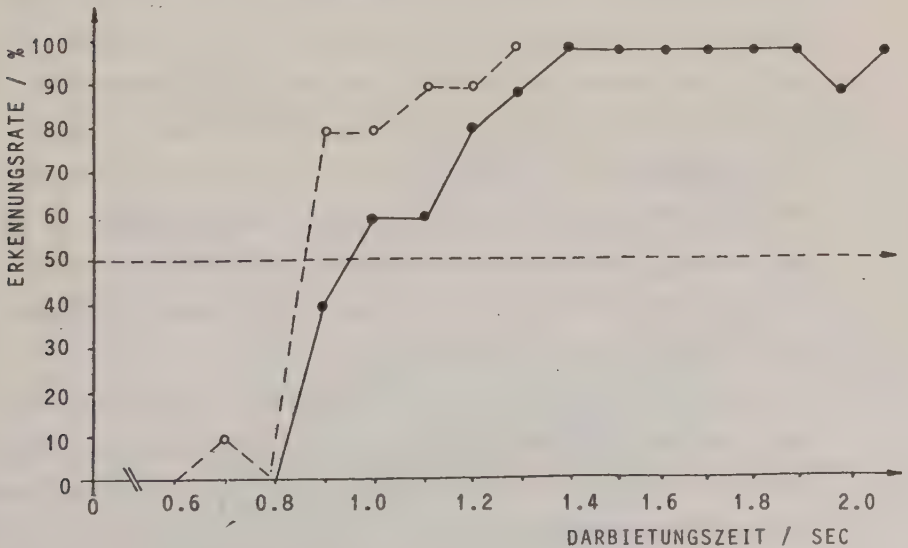


Abb. 18 Verlauf der Erkennungsrate für einen Sprung von 0 dpt nach -3,3 dpt (—) und zurück. (VA 0.7)

Sowohl in der Darbietungszeit für eine Erkennungsrate von 50 % und damit der Akkommodationszeit als auch in der Steigung der Kurven finden sich bei den Testpersonen individuell große Unterschiede. Auffallend ist dabei vor allem der unterschiedliche Kurvenverlauf zwischen den Werten 25 % und 75 % der Erkennungsrate, d.h. dem für die Ermittlung der Akkommodationszeit bedeutenden Abschnitt.

Bei Probanden, für die überdurchschnittlich lange Akkommodationszeiten ermittelt wurden, zeigt sich ein flacher Anstieg der Kurve (Abb. 16). Während die Versuchspersonen mit kürzeren Akkommodationszeiten einen angenähert kontinuierlichen Anstieg in diesem Abschnitt erkennen lassen (Abb. 13, 14), erweist sich der Anstieg bei langsamer akkommodierenden Probanden als diskontinuierlich (Abb. 16). Bei diesen Versuchspersonen wird durch eine Verlängerung der Darbietungszeit um 0,1 sec offensichtlich keine Steigerung der Erkennungsrate erreicht. In unmittelbarer Umgebung des 50 % - Wertes der Erkennungsrate findet sich jedoch bei der überwiegenden Mehrheit der Versuchsteilnehmer eine steile Anstiegsphase. In diesem Abschnitt nähert sich die Darbietungszeit der Akkommodationszeit, woraus sich für die Probanden eine steigende Sicherheit im Erkennen der Testzeichenstellung ergibt.

Im Bereich von sehr kurzen Darbietungszeiten zwischen 0,2 sec und 1 sec werden sowohl kontinuierlich steile als auch stufenförmige Anstiege der Kurven gefunden. Bei stufenförmigem Kurvenverlauf bleibt die Erkennungsrate über mehrere Darbietungszeit-

stufen hinweg konstant (Abb. 13 - 18).

Es fällt auf, daß die jeweils erreichte Akkommodationszeit offensichtlich in keinem festen Zusammenhang mit der für das Erreichen der 100 % - Erkennungsrate benötigten Darbietungszeit steht.

Ein Proband mit einer kurzen Akkommodationszeit muß also nicht zwangsläufig alle angebotenen Testzeichenstellungen früher erkennen können als eine Versuchsperson mit einer langen Akkommodationszeit (Abb. 14, 18).

Die Kurven für die beiden Akkommodationsrichtungen in die Nähe bzw. in die Ferne zeigen zwar einen sehr grob angenähert S - förmigen Verlauf, sie sind jedoch individuell von Messung zu Messung sehr unterschiedlich.

Bei den von uns untersuchten Testpersonen finden sich bei Verwendung verschieden großer Testzeichen folgende Ergebnisse (Tab. 1):

Testzeichenvisusanforderung	Akk. in die Nähe	Akk. in die Ferne
0,6	0 dpt nach - 3,3 dpt 0,52 sec bis 1,8 sec MW: 0,95 sec SA: + 0,27 sec n = 30	- 3,3 dpt nach 0 dpt 0,4 sec bis 1,8 sec MW: 1,106 sec SA: + 0,32 sec n = 30
0,7	0,8 sec bis 1,8 sec MW: 1,16 sec SA: + 0,25 sec n = 24	0,95 sec bis 2,1 sec MW: 1,47 sec SA: + 0,33 sec n = 24

n = Anzahl der Versuchspersonen

Tab. 1 Akkommodationszeiten für verschiedene Testzeichenvisusanforderungen

Die Häufigkeitsverteilung für die ermittelten Akkommodationszeiten zeigt bei einer Visusanforderung 0.6 eine Häufung der Probanden bei Akkommodationszeiten zwischen 0,6 sec und 1,1 sec bei Akkommodation in die Nähe (Abb. 19) und zwischen 0,8 sec und 1,4 sec für die Akkommodation in die Ferne (Abb. 20). Bei der Visusanforderung 0.7 findet sich bei der Nahakkommodation eine Häufung der Akkommodationszeiten zwischen 0,9 sec und 1,4 sec (Abb. 21); bei der Fernakkommodation finden sich zwei Versuchspersonengruppen mit Häufungen bei Akkommodationszeiten zwischen 1,1 sec und 1,4 sec sowie zwischen 1,7 sec und 2,1 sec (Abb. 22)

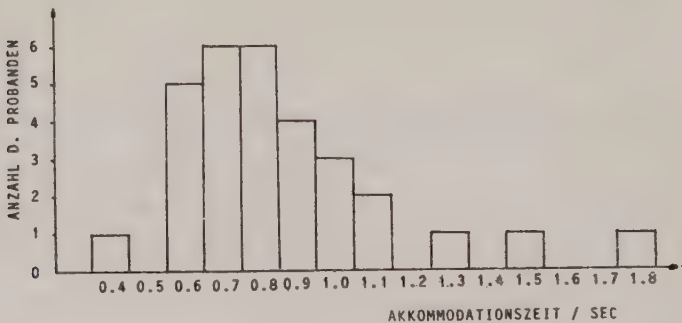


Abb. 19 Häufigkeitsverteilung der Akkommodationszeiten bei einem Sprung von 0 dpt nach -3,3 dpt (30 Probanden; Visusanforderung 0.6)

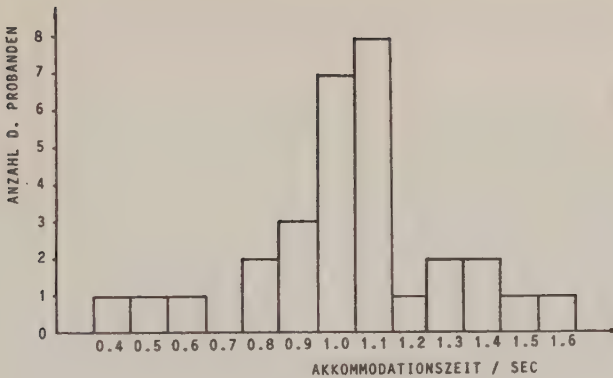


Abb. 20 Häufigkeitsverteilung der Akkommodationszeiten
bei einem Sprung von -3,3 dpt nach 0 dpt.
(30 Probanden; Visusanforderung 0.6)

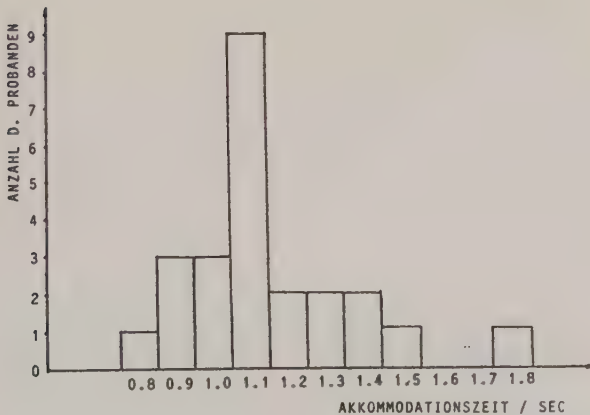


Abb. 21 Häufigkeitsverteilung der Akkommodationszeiten
bei einem Sprung von 0 dpt nach -3,3 dpt
(24 Probanden; Visusanforderung 0.7)

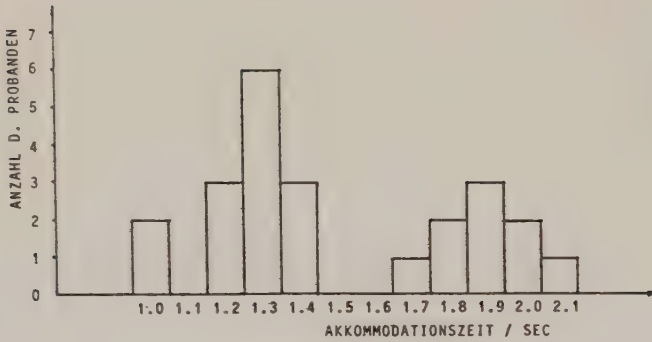


Abb. 22 Häufigkeitsverteilung der Akkommodationszeiten
bei einem Sprung von -3,3 dpt nach 0 dpt
(24 Probanden; Visusanforderung 0.7)

5. 2 Vergleich der Ergebnisse für die Fern - nach - Nah -
und die Nah - nach - Fern - Akkommodation

Grundsätzlich erweist sich der Akkommodationsablauf für die Einstellung des Auges in die Nähe als schneller im Vergleich mit der Akkommodation in die Ferne. Bei unserem Versuch erreichten 23 von 30 gemessenen Testpersonen eine kürzere Akkommodationszeit für die Akkommodation in die Nähe.

Auf den Mittelwert bezogen finden sich für die Testzeichenvisusanforderung 0,6 Akkommodationszeiten für die Akkommodation in die Nähe, die um 0,15 sec kürzer sind als diejenigen für die Akkommodation in die Ferne. Bei Visusanforderung 0,7 erhalten wir eine Zeitdifferenz von 0,31 sec zugunsten der Akkommodation in die Nähe.

Bei der Verwendung beider Testzeichengrößen fällt auf, daß sich bei der Fern - nach - Nah - Akkommodation eine geringere Streubreite der Meßergebnisse einstellt als dies für die Nah - nach - Fern - Akkommodation der Fall ist.

Inbesondere in dem Kurvenabschnitt, der zwischen der 50 % - Erkennensrate und der 100 % - Erkennensrate liegt, zeigt sich bei der Nah - nach - Fern - Akkommodation in größerer Zahl ein flacher Anstieg der Kurve. Dies läßt erkennen, daß selbst bei großzügig bemessenen Darbietungszeiten Schwierigkeiten beim sicheren Erkennen des Testzeichens im Fernpunkt vorhanden sind. Eine solche Abflachung wird bei Kurven für die Akkommodation in die Nähe nur selten gefunden (Abb. 16).

5. 3 Vergleich der monokular ermittelten Akkommodationszeiten mit binokular gemessenen derselben Beobachter

Aus organisatorischen Gründen war es nicht möglich, Testpersonen, die an einem binokular durchgeführten Meßprogramm teilnahmen, unter denselben Versuchsbedingungen, d.h. mit demselben, von uns durchgeführten Entfernungssprung von 0 dpt auf -3,3 dpt und umgekehrt, monokular zu messen. Das binokulare Meßprogramm wurde auf ähnliche Weise wie das monokulare tachistoskopische durchgeführt, wobei die Sehzeichen in einer Zweischritt-Strategie von einer Anfangsentfernung ausgehend in zwei Entfernungsstufen dargeboten wurden. Die bei beiden Meßprogrammen ermittelten Werte seien im folgenden einander gegenübergestellt (Tab. 2):

Testp.	bin.	Akk.zeit (s)		mon.	Akk.zeit (s)	
	Entf.sprung	N - F	F - N	Entf.sprung	N - F	F - N
1	0,5 - 2,5 dpt	0,50	0,59	0 - -3,3 dpt	1,05	0,93
2	1,0 - 2,5 dpt	0,35	0,39	0 - -3,3 dpt	0,95	0,77
3	0,5 - 2,5 dpt	0,50	0,46	0 - -3,3 dpt	1,00	1,80

Tab. 2 Vergleich von binokular und monokular ermittelten Akkommodationszeiten

Bei den Ergebnissen, die die Probanden 1 bis 3 bei der Messung

mit beiden Meßmethoden, also der monokularen wie der binokularen erbrachten, fällt auf, daß zwei Testpersonen (1 und 2) bei binokularen Messungen für die Akkommodation in die Ferne kürzere Zeiten erreichen, als dies für die Akkommodation in die Nähe der Fall ist. Bei beiden Versuchspersonen findet sich bei der monokularen Meßweise eine nur sehr geringfügige Differenz der Akkommodationszeiten für die Nah- bzw. Fernakkommodation. Der Verlauf der entsprechenden Kurven ist dabei sehr ähnlich. Die von diesen Versuchspersonen erreichten Akkommodationszeiten dürfen im Vergleich mit anderen als überdurchschnittlich kurz bezeichnet werden.

5. 4 Der Einfluß der Übung des Beobachters auf die Akkommodationszeit

Die Übung der Versuchspersonen bzw. die Vertrautheit mit Testgerät und Versuchsablauf muß bei der Wertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Bei Probanden, die an verschiedenen Tagen zur Messung eingestellt wurden, findet sich, als Folge eines Lerneffekts, bei den später stattfindenden Messungen eine nicht unwesentliche Vergrößerung der Akkommodationsgeschwindigkeit. Die Abb. 23 zeigt das Diagramm einer Versuchsperson, die aus organisatorischen Gründen im zeitlichen Abstand von einer Woche ein zweites Mal gemessen werden mußte.

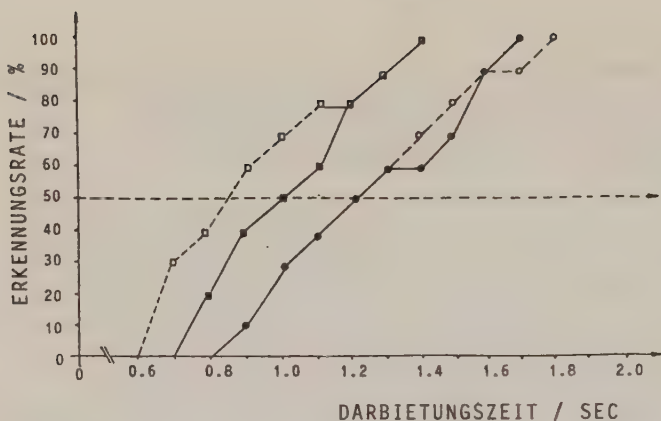


Abb. 23 Verlauf der Erkennungsrate bei zwei Messungen
im Abstand einer Woche (1. Messung)

Die monokular ermittelten Kurven für die Nah- und Fernakkommodation weichen dabei von den früher ermittelten hinsichtlich ihres Verlaufs nicht wesentlich ab, bei der ungeübten Versuchsperson ergeben sich allerdings für die Fern - nach - Nah- Akkommodation um 0,15 sec und für die Nah - nach - Fern - Akkommodation um 0,05 sec längere Akkommodationszeiten. Die ermittelten Kurven differieren im kritischen Bereich zwischen der 25 % - Erkennungsrate und der 75 % - Erkennungsrate stärker bei der Fernakkommodationsmessung. Im Kurvenabschnitt hin zur 100 % - Erkennungsrate lassen die Kurven für die Nahakkommodation einen identischen Verlauf erkennen.

Bei einer Versuchsperson, die im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit täglich mehrere Stunden an einem Bildschirmgerät arbeitet, werden bei unserer Messung mit 1,2 sec bzw. 1,8 sec für die Fern - nach - Nah - Akkommodation und 1,8 sec bzw. 2,0 sec für

die Nah - nach - Fern - Akkommodation überdurchschnittlich lange Zeiten gefunden. Die Akkommodation in die Nähe verläuft bei dieser Messung für eine Visusanforderung 0,6 um 0,6 sec und bei einer Visusanforderung von 0,7 um 0,2 sec schneller als die Akkommodation in die Ferne.

5. 5 Erfahrungen mit der Instrumentenmyopie

Die 30 gemessenen Probanden rekrutierten sich aus einem weit- aus umfangreicheren Kollektiv von über 50 ausgewählten Test- personen, die bei der Überprüfung auf mögliche Sehschwächen keinen positiven Befund erbrachten. Die restlichen Probanden konnten am weiteren Verlauf der Messungen nicht teilnehmen, da sie trotz großer Konzentration und Arbeitseifers nicht in der Lage waren, das Testzeichen im Fernpunkt zu erkennen bzw. dafür Darbietungszeiten benötigten, die im Einzelfall bis zu mehreren Sekunden über denen der geeigneten Testpersonen lagen. Der Grund hierfür liegt in einer Erscheinung, die als Instrumentenmyopie bezeichnet wird (s.S.51). Bei diesen Versuchspersonen stellt sich die Akkommodation auf die Nähe oder Ferne ein und bleibt stehen. Der Grund hierfür liegt in den bei unserem Versuch fehlenden zusätzlichen Richtungsinformationen an der Peripherie des Darbietungszeichens. Der umgekehrte Fall, daß also das Test- zeichen bei Darbietung in der Nähe nicht erkannt wurde, stellte einen Ausnahmefall dar. Bei Darbietung in der Ferne wurde die

Testzeichenstellung von der Versuchsperson erkannt.

6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der monokularen Messung der Akkommodationszeit mit Testzeichen unterschiedlicher Größe lassen folgende Aussagen zu:

1. Die gemessenen Akkommodationszeiten sind von der Größe der verwendeten Testzeichen abhängig. Für ein Testzeichen mit der Visusanforderung 0,6 ergibt sich bei einem Entfernungssprung von 0 dpt auf -3,3 dpt ein mittlerer Wert von 0,95 sec bei einer Standardabweichung von $\pm 0,27$ sec. Für den Entfernungssprung von -3,3 dpt auf 0 dpt ergibt sich eine Akkommodationszeit von 1,1 sec bei einer Standardabweichung von $\pm 0,32$ sec.

Bei Visusanforderung 0,7 erhalten wir für die Nahakkommodation Werte von 1,16 sec ($\pm 0,25$ sec) im Mittel und bei der Akkommodation in die Ferne einen Mittelwert von 1,47 sec ($\pm 0,33$ sec).

2. Zwischen den Zeiten für die Nah - nach - Fern - Akkommodation und die Fern - nach - Nah - Akkommodation besteht unabhängig von der Testzeichengröße ein deutlicher Unterschied.

Die Akkommodation in die Nähe zeigt für den weitaus größten Teil der Versuchsteilnehmer kürzere Zeiten. Das

Erkennen des Testzeichens beim Sprung in die Nähe fällt leichter, die Sicherheit des Erkennens wird höher, wie das Kurvenverhalten im kritischen Bereich um die 50 % Erkennungsrate ausdrückt.

3. Ein Vergleich der Akkommodationszeiten bei binokularen und monokularen Messungen läßt den Schluß zu, daß die binokulare Akkommodation schneller verläuft. Bei beiden Meßmethoden finden sich Probanden, bei denen die Nah - nach - Fern - Akkommodation im Gegensatz zur Mehrheit der Versuchspersonen eine kürzere Akkommodationszeit benötigt.
4. Die Übung des Probanden im Umgang mit dem Gerät und mit den visuellen Anforderungen des Meßprogramms hat eine nachweisbare Auswirkung auf das Testergebnis. Bei geübten Testpersonen zeigen sich kürzere Akkommodationszeiten in beide Akkommodationsrichtungen.
5. Das Auftreten einer Instrumentenmyopie war vor allem hinsichtlich der Auswahl der Versuchspersonen von Bedeutung. SCHÖBER (1970) beobachtete, daß normalsichtige Personen beim Mikroskopieren nicht den möglichen Akkommodationswert " ∞ " am Gerät einstellten, sondern einen Entfernungswert in der Nähe, der dem realen Abstand (ca. 30 cm) des Sehobjektes entsprach. Ähnliche Beobachtungen machten wir bei unseren Messungen. Die Versuchspersonen akkommodieren im Tachistoskop unbewußt auf den "wahrscheinlich" realen maximalen Entfernungswert

von 0,3 m bis 1 m (= -3 bis -1 dpt) des Testzeichens, da eine Entfernung "Unendlich" (∞) bei den gegebenen Abmessungen des Geräts nicht möglich erscheint.

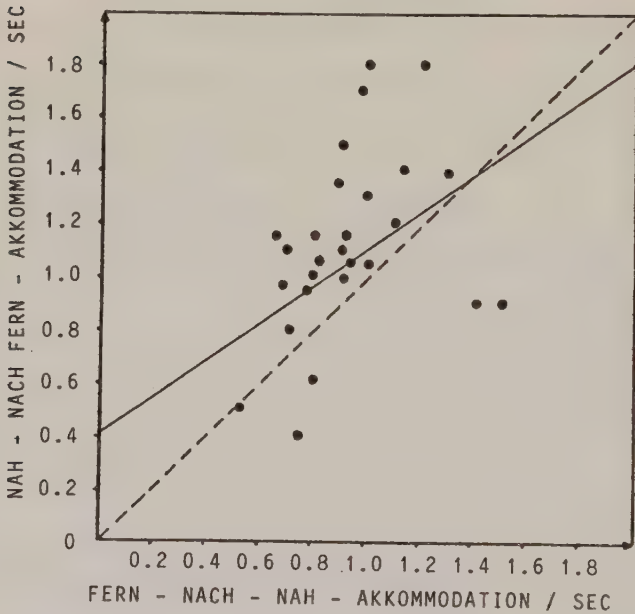


Abb. 24 Verteilung der Akkommodationszeiten

7. Diskussion der Ergebnisse

Wie schon an anderer Stelle erwähnt, hat sich bereits in der Vergangenheit eine große Zahl von Autoren mit der Messung der Akkommodationszeit bzw. mit der Beschreibung

des zeitlichen Ablaufs der Akkommodation beschäftigt. Von ähnlichem Interesse war die Untersuchung des Zusammenhangs von Akkommodation und anderen optischen Funktionen wie Konvergenz und Pupillenmotorik.

Bei diesen Untersuchungen wurden als mittlere Dauer der Akkommodationseinstellung in die Nähe Zeiten zwischen 0,5 sec und 1,5 sec, für die Einstellung in die Ferne Zeiten zwischen 0,8 sec und 1,3 sec ermittelt.

Diese Werte werden allerdings durch eine Reihe äußerer Einflüsse berührt, die auch unter sorgfältig geplanten Versuchsbedingungen nicht ausgeschaltet werden können. Dazu gehören Dysregulationen des autonomen Nervensystems ebenso wie Abhängigkeiten der Akkommodationszeit von Umwelttemperatur, akustischen Einflüssen und der Wellenlänge des Lichts (SACHSENWEGER, 1969).

Aus dem Vorhandensein solcher Störfaktoren muß gefolgert werden, daß die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Werte ebenso wie die in der Vergangenheit ermittelten Meßergebnisse nur mit Einschränkung und im Zusammenhang mit den jeweils herrschenden Versuchsbedingungen als repräsentativ angesehen werden können. Neben dem Einfluß der Tageszeit, zu der die Messung durchgeführt wurde, gehen auch die körperliche und seelische Verfassung der Probanden als Störgröße mit in die Untersuchung ein. Nach LEVETT (1977) kommt auch dem Parameter Blutalko-

holspiegel eine große Bedeutung zu. So fand sich bei einer Steigerung des Blutalkoholspiegels von 0,5 Promille auf 1 Promille eine Zunahme der Akkommodationszeit um 10 - 30 Prozent.

Die Mehrheit der bisherigen Arbeiten über die Akkommodationszeit verwendeten ebenso wie wir eine monokulare Meßmethode, um den Einfluß der Konvergenz auf die Akkommodation auszuschalten. Dies bedeutet allerdings auch eine Einschränkung der natürlichen Sehbedingungen. Die völlige Ausschaltung der Konvergenzbewegungen ist allerdings auch mit dieser Meßmethode nicht zu erreichen, da auch beim monokularen Sehen immer noch eine unsymmetrische Konvergenzbewegung besteht; diese entsteht dadurch, daß das beobachtende Auge im verwendeten Versuchsaufbau seine Blickrichtung behält, während das ausgeschaltete Auge über die Akkommodation konvergiert. Nach FINCHAM u. WALTON (1957) unterstützt die beim monokularen Sehen während der Akkommodation auftretende Konvergenz wiederum die Akkommodation, so daß sich ihrer Meinung nach beide Teilfunktionen gegenseitig Hilfestellung leisten. Die akkommodative Konvergenz kann dabei das Ausmaß der binokularen Konvergenz erreichen.

Die Heterophorie, eine Störung des Muskelgleichgewichts beider Augen, die jedoch durch den Fusionszwang latent bleibt, kann bei Ermüdung und Erschöpfungszuständen zu mangelnder Ausdauer bzw. Schwäche beim Nahsehen führen, bis hin zum Auftreten von Doppelbildern. Da sich beim

monokularen Sehen die Heterophorie nicht auswirkt, die akkommodative Konvergenz jedoch durchaus den Umfang der binokularen Konvergenz erreichen kann, wäre es erklärbar, daß das Nahsehen unter monokularen Bedingungen dem binokularen Nahsehen mindestens ebenbürtig ist (SLOAN, 1951). Wenn man Menschen beobachtet, die - wie die Strickerin beim Einfädeln - mit kleindimensionierten Arbeitsgeräten umgehen, wird man oft sehen, daß viele von ihnen ein Auge geschlossen halten, während sie in einer, dem Nahpunkt entsprechenden Entfernung, ihre Arbeit verrichten.

Wie die vorliegenden Akkommodationszeitdifferenzen zeigen, ist die Größe des Gegenstandes, auf den akkommodiert werden soll, von Bedeutung. Das zu fixierende Objekt muß zumindest so beschaffen sein, daß es in allen dargebotenen Entfernungen erkannt werden kann. Dabei ist bei der Projektion auf einen ausreichenden Kontrast zu achten. Die Größe des Testzeichens muß über einer bestimmten Erkennensschwelle liegen. Bei zu kleinen Testzeichen können die Akkommodationszeiten sehr lang werden. Auch bei der Fixation ergeben sich dann Schwierigkeiten, da das Testzeichen durch Schwankungen der Linsenbrechkraft nur begrenzte Zeit scharf gesehen werden kann und das Auflösungsvermögen der Retina Grenzen hat (CAMPBELL, 1959, 1960). Da das Testzeichen in allen Entfernungen gut erkennbar sein soll, muß der Sehwinkel konstant ge-

halten werden; dies wird durch unseren Versuchsaufbau gewährleistet. Der gleichbleibende Sehwinkel wird durch das Einschalten einer Sammellinse zwischen Auge und Fixationsobjekt ermöglicht. Ob die Sehschärfe von der Entfernung zwischen Beobachter und Testzeichen unabhängig ist, ist fraglich. BOUMA (1936) postuliert eine Entfernungsabhängigkeit der Sehschärfe; dies wird jedoch von anderen Autoren angezweifelt.

Die Aufgabe der Fern - nach - Nah - Akkommodation wird von den, in unserer Meßreihe gemessenen Probanden schneller ausgeführt als die Nah - nach - Fern - Akkommodation. Ähnliche Erfahrungen machten die meisten Autoren (STEINDORFF, 1969), die sich bisher mit der Messung des zeitlichen Ablaufs der Akkommodation beschäftigten. Festzustellen bleibt, daß auch der umgekehrte Fall beschrieben wird, also eine kürzere Akkommodationszeit für die Akkommodation in die Ferne. Die relativ lange Zeit für die Nah - nach - Fern - Akkommodation stützt die Hypothese, daß man die Akkommodationseinstellung auf Unendlichkeit nicht als die Akkommodationsruhelage betrachten darf, sondern daß für diese Einstellung eine aktive negative Akkommodationsanstrengung zu leisten ist. Diese Akkommodationslage als Grenzlage der Akkommodation ist schwieriger einzustellen als eine Akkommodationseinstellung im Nah - oder Mittelbereich. Nach FITTS (1968), der Messungen durch elektrische Stimulation am Oculomotoriuskern von Katzen vornahm, hängt die

zentrale Kontrolle der Akkommodation von der Reizfrequenz und vom Reizort in diesem Nerven Kern ab. Die Akkommodation in die Nähe wird von dorsalen und medialen Teilen des Kerns durch eine hohe Frequenz (120 Hz) hervorgerufen. Die Akkommodation in die Ferne ist das Ergebnis der Reizung von rostralen und lateralen Gebieten dieses Nerven kerns bei einer Frequenz von 60 bis 90 Hz. PITTS findet bei seinem Experiment eine kürzere Zeit für die Akkommodation in die Nähe als in die Ferne. Dieser richtungsabhängige, zeitlich unterschiedliche Akkommodationsablauf wird aus der elastisch-aktiven Wirkungsweise des Akkommodationssystems sowie der nachgewiesenen unterschiedlichen Aktivität des Ziliarmuskels hergeleitet.

Die Tatsache, daß für diese Messungen jeweils andere Meßgeräte und Meßmethoden angewandt wurden, schränkt die unmittelbare Vergleichbarkeit der ermittelten Ergebnisse allerdings ein. GRÖNHOLM (1910) stellte fest, daß es bei der Akkommodation von Nah auf Fern zu beträchtlichen Unterschieden in der Akkommodationszeit komme, was er auf Schwierigkeiten bei der Einstellung auf Unendlich zurückführte. Bei dieser Akkommodationsbewegung beobachtete er subjektiv ein starkes Zittern des zu fixierenden Spalts. Dadurch würde das bereits gesehene Bild wieder zur Auflösung gebracht. Die Unterschiedlichkeit der einwirkenden elastischen Kräfte bei der Akkommodation in die Ferne und in die Nähe und die daraus resultierende Linsenform dienen ihm als Erklärung für diese Erscheinung. Die von unseren Probanden geschilderte Schwierigkeit, auf den Fernpunkt

zu akkommodieren, kommt in unserer Arbeit durch ein Schwanken der Erkennensrate beim Übergang zur 100 % - Erkennensrate zum Ausdruck; dieses Schwanken ist bei den einzelnen Versuchspersonen unterschiedlich ausgeprägt. Ob der Grund dafür in den unterschiedlichen Zugkräften des Halteapparates oder in der Form der Innervation zu suchen ist, konnte im Rahmen unserer Arbeit nicht geklärt werden. Eine vergleichbare Unsicherheit im Erkennen des Nahpunkts ist - zumindest bei Jugendlichen - im Rahmen dieser Arbeit nicht erkennbar.

MIZUKAWA et al. (1963) erhalten bei ihrer Untersuchung über den Verlauf der Akkommodation Ergebnisse, die einen Vergleich mit den von uns ermittelten Akkommodationszeiten zulassen. Wenn man die Verzögerung im zeitlichen Ablauf der Akkommodation vor Erreichen des Fernpunkts jener vor Erreichen des Nahpunkts gegenüberstellt, so ergibt sich auch in diesem Fall eine geringere Akkommodationszeit für die Akkommodation in die Nähe. Es scheint, daß die Akkommodation in die Nähe dabei durch die akkommodativ gesteuerte Konvergenz unterstützt wird (Abb. 7).

Während des Versuchs zeigte sich die auffallende Tendenz einiger Versuchspersonen, das vom Fernpunkt in den Nahpunkt springende Testzeichen vorauszuakkommodieren; d.h. den Akkommodationsapparat aktiv zu bewegen, bevor das Testzeichen tatsächlich bewegt wurde. Vor allem psycholo-

gische Faktoren, in unserem Falle eine Konditionierung durch akustische Signale zur Kennzeichnung einzelner Meßabschnitte, scheinen zu dieser Vorausakkommodation zu führen. Mehrere Probanden bezeichneten die während des Testlaufs verwendeten Tonsignale als eine Art von "Startsignal", das für sie einen Reiz zur Vorausakkommodation darstelle. Augenfällig war besonders die Tatsache, daß diese Versuchspersonen vor allem für die Akkommodation in die Nähe auffällig gute Ergebnisse, d.h. extrem kurze Akkommodationszeiten erreichten. Um diesen Einfluß auf die Messung auszuschalten, benutzten wir eine kurzzeitige Darbietung des Testzeichens in der Ausgangsentfernung mit veränderter Stellung als Kontrolle. Erst wenn die Kontrollstellung richtig erkannt wurde, sprang das Testzeichen in die Zielentfernung. Es scheinen also neben physiologisch-optischen Gründen vor allem psychologische Faktoren zu sein, die bei den Probanden ein Vorausakkommodieren auslösen. In unserem Fall handelt es sich dabei um eine Konditionierung durch akustische Signale während des Versuchsablaufs.

Eine weitere Beobachtung, die wir während der Versuche machten, war eine Erscheinung, die in der Literatur als "Instrumentenmyopie" bezeichnet wird. Während die Nachtmyopie unter den Bedingungen eines ungenügenden Stimulus infolge mangelnden Kontrastes oder Detailmangels im Ge-

sichtsfeld auftritt, kennzeichnet die Instrumentenmyopie eine ständige unangemessene Akkommodation, die beim Gebrauch von optischen Instrumenten auftreten kann. HENNESSY (1970) bietet die Erklärung an, daß das Fehlen eines geeigneten Stimulus zu einer Rückkehr der Akkommodation in die Ruhelage führe. Die Ergebnisse von LEGRAND (1967) deuten ebenfalls auf einen Zusammenhang zwischen Instrumentenmyopie und der Einstellung einer Akkommodationsruhelage hin. So findet er, daß das Auge bei Akkommodation in die Nähe leicht unterakkommodiert, während es bei der Akkommodation in die Ferne einen leichten Akkommodationsüberschuß aufweist. Die Akkommodation nimmt demnach also eine Ruhelage ein, und die Richtung des Akkommodationsfehlers hängt davon ab, ob das fixierte Objekt näher oder weiter entfernt ist, als die der Ruhelage entsprechende Distanz (TOATES, 1972).

Eine große Zahl von Versuchsteilnehmern war nicht in der Lage, auf den Fernpunkt zu akkommodieren; für einige wenige Fälle trifft dies auch für die Akkommodation in die Nähe zu. Offensichtlich stellte das dargebotene Testzeichen für diese Probandengruppe keinen ausreichenden Stimulus dar. Während es bei einigen Versuchsteilnehmern gelang, dieses Hindernis langsam abzubauen und von extrem langen Darbietungszeiten für die Entfernung 0 dpt zu durchschnittlich langen zu gelangen, mußte dieser Versuch

bei der Hälfte der Probanden abgebrochen werden, da es ihnen nicht gelang, auf das Testzeichen zu akkommodieren. Allerdings gelang es diesen Probanden, das Testzeichen im Nahpunkt zu sehen bzw. kleinere Entfernungssprünge des Testzeichens zu verfolgen. Da einige dieser Testpersonen zuvor eine binokulare Messung an einem vergleichbaren Versuchsaufbau erfolgreich abgeschlossen hatten, kann man dieses Resultat in einen Zusammenhang mit der Beobachtung SCHOBER's (1948) bringen. Dieser stellte bei binokularem Sehen eine geringere Instrumentenmyopie fest als dies bei monokularem Sehen der Fall ist.

Bei Betrachtung unserer Ergebnisse kann auch die Erkenntnis erhärtet werden, daß Personen, die im Umgang mit mikroskopischen Geräten vertraut sind, bessere Ergebnisse zeitigen als ungeübte Probanden. SCHOBER zufolge ist die Instrumentenmyopie die Folge der vom Beobachter subjektiv geschätzten Entfernung; in dieselbe Richtung deuten Äußerungen unserer Probanden, daß sie sich nicht vorstellen könnten, daß Entfernungssprünge von der Größenordnung unserer Akkommodationsaufgabe in den von uns verwendeten Geräten mit relativ kleinen Abmessungen stattfinden könnten. Wie Abb. 23 zeigt, wird das Ergebnis der Messungen nicht unerheblich von der Übung der Testperson hinsichtlich Sehaufgabe und Vertrautheit mit dem Versuchsablauf beeinflusst. Der Grund dafür dürfte vor allem darin

zu suchen sein, daß der Faktor "Instrumentenmyopie" an Gewicht verliert. Die Versuchspersonen vermögen nach längerer Übung am Testgerät die Sehzeichenentfernung besser zu erfassen und verbessern auf diese Weise ihre Akkommodationsgenauigkeit, was schließlich zu einer Erhöhung der absoluten Akkommodationsgeschwindigkeit führt.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Akkommodationszeit bei Verwendung verschieden großer Testzeichen monokular mit einem rechnergesteuerten Tachistoskop ermittelt.

Die Akkommodationszeit wurde subjektiv gemessen; die Testzeichen wurden dabei sukzessiv in zwei Entfernungsstufen - einer Ausgangsentfernung und einer zweiten Entfernung - dargeboten, zwischen denen ein Akkommodationswechsel stattfinden sollte. Die Darbietungszeit des Testzeichens in der zweiten Entfernungsstufe wurde variiert.

Durch Auftragen der Meßergebnisse in Diagramme wurden Verlaufskurven der Erkennungsrate erstellt; auf der Ordinate dieser Diagramme ist die Erkennensrate und auf der Abszisse die Darbietungszeit der Testzeichen abzulesen. Die Akkommodationszeit entspricht derjenigen Darbietungszeit, bei der 50 % der Testzeichen richtig erkannt wurden.

Die Meßergebnisse zeigen, daß die Akkommodationszeit von der Größe des Testzeichens abhängig ist. Bei Darbietung von größeren Testzeichen werden kürzere Akkommodationszeiten gefunden. Die Akkommodation in die Nähe benötigt eine kürzere Zeit als die Akkommodation in die Ferne. Die binokulare Akkommodation verläuft schneller als die monokulare.

Von großer Bedeutung für den Ablauf der Messung und das individuelle Meßergebnis der Probanden erwies sich die Übung mit dem Testgerät sowie der Einfluß der Instrumentenmyopie.

Literatur

- ALLEN, M.J. The Influence of Age on the Speed of Accommodation. Am. Journ. of Optom. and Arch. of Am. Acad. of Optom. Vol. 33 Nr. 4 S 201 - 208, 1956
- ALPERN, M. Vergence and Accommodation, II. Is accommodative vergence related merely to the accommodation stimulus? Arch. Ophthalmol. (N.Y.) 60 S. 358 - 360 1958
- ALPERN, M., KINCAID, W.M. and LUBECK, M.J. Vergence and accommodation: III. Proposed definitions of AC/A ratios. Am. J. Ophthalmol. 48 S. 141 - 148, 1959
- BARRETT, J.W. The Velocity of accommodation. Journ. of Physiol. Vol. VI S. 46, 1885
- BOUMA, P.I. Sehschärfe und Wahrnehmungsgeschwindigkeit bei der Straßenbeleuchtung. Philips Techn. Rundschau Bd. 1 S. 215, 1936
- BRÜCKNER, A. Optische Konstanten (Elemente), Refraktion, Akkommodation Tab. Biol. Bd. XXII, Pars 3 Fasc. 4 (oculus), 1963
- BREININ, G.M. Relationship between accommodation and convergence. Trans. Am. Acad. Ophthalm. Otolaryngol. 61 S. 375 - 382, 1957
- CAMPBELL, F.W., ROBSON, J. and WESTHEIMER, G. The control of accommodation in the hu-

- man eye. In: Proc. Intern. Congr.
Cybernetics. Namur 1958 S. 924 - 929
- CAMPBELL, F.W. and WESTHEIMER, G.
Factors influencing accommodation
responses of the human eye. J. Opt.
Soc. Am. 49 S. 568 - 571, 1959
- CAMPBELL, F.W. and WESTHEIMER, G.
Fluctuations of accommodation under
steady viewing conditions. J. Physiol.
(London) 143: S. 579 - 594, 1959
- CAMPBELL, F.W. and WESTHEIMER, G.
The accommodation response of the human
eye. Brit. Journ. of Physiol. N.S. 16,
1959
- CAMPBELL, F.W. and WESTHEIMER, G.
Dynamics of accommodation responses
of the human eye. J. Physiol. (Lon-
don) 151 S. 285 - 295, 1960
- CAMPBELL, F.W. Correlation of accommodation between
the two eyes. J. Opt. Soc. Am. 50: S. 738,
1960
- COGAN, D.G. Accommodation and the autonomic nervous
system. Arch. Ophthalmol. (N.Y.) 18
S. 739 - 766, 1937
- FINCHAM, E.F. and WALTON, J.
The reciprocal action of accommodation
and convergence. J. Physiol. 137 S. 488
- 508, 1957

- FINCHAM, E.F. The accommodation reflex and its stimulus. Brit. Journ. Ophthalmol. Vol. 35
S. 381 - 393, 1951
- FINCHAM, E.F. The reflex action of accommodation. In:
Trans. Intern. Optical Congr. London
British Optical Society 1951, S. 105 -
114
- FINCHAM, E.F. The proportion of ciliary muscular
force required for accommodation.
J. Physiol. (London) 128 S. 99 - 112,
1955
- GRÖNHOLM, V. Studien über den zeitlichen Verlauf
der Akkommodation und der mit der Akkom-
modation assoziierten Fusionsbewegungen
der Augen unter normalen und einigen
pathologischen Verhältnissen. Arch. f.
Augenheilkunde Bd. 67 Erg. Heft S. 119,
1910
- GULLSTRAND, K. Der Mechanismus der Akkommodation.
Zus. in: H. v. Helmholtz, Handbuch der
Physiolog. Optik Bd. 1, 1909
- HEATH, G. G. Components of accommodation. Am. J.
Optom. 33 S. 569 - 579, 1956
- HENNESSY, R.T. and LEIBOWITZ, H.
Subjective measurement of accommodation
with laser light. J. Opt. Soc. Am. 60
S. 1700 - 1701, 1970

- ITTELSON, W.H. and AMES, A.
Accommodation, convergence and their
relation to apparent distance. J.
Psychol. 30 S. 43 - 62, 1950
- IVANOFF, A.
Chromatic aberration of the eye. Doc.
Ophthalmol. 3: S. 322 - 333, 1949
- LEGRAND, Y.
Form and Space Vision (Indiana U.
p.) Bloomington, Ind., 1967
- LEIBOWITZ, H.W. and OWENS, D.A.
Anomalous myopias and their inter-
mediate dark focus of accommodation.
Science 189 S. 646 - 648, 1975
- LEIBOWITZ, H.W. and OWENS, D.A.
Night myopia and the intermediate
dark focus of accommodation. J. Opt.
Soc. Am. 65 S. 1121 - 1128, 1975
- LEVETT, J. and KARRAS, L.
Effects of alcohol of human accommo-
dation. Aviation, Space and Environ-
mental medicine 48 S. 434, 437, 1977
- MEESMAN, A.
Experimentelle Untersuchungen über
die antagonistische Innervation der
Ciliarmuskulatur. A. v. Graefe's Archiv
Ophthalmol. 152 S. 335 - 356, 1952
- MIZUKAWA, T., NAKABAYASHI, M. and MANABE, R.
Studies on accommodation. Japan.J.
Ophthalmol. 7: 29 - 36, 1963

- MOHNEY, J.B., MORGAN, M.W., OLMSTEAD, J.M.D. and WAGMAN, I.H.
The pathway of sympathetic nerves
to the ciliary muscles in the eye.
Am J. Physiol. 135 S. 759 - 762, 1942
- MONJE, M.
Über pharmakodynamische und klinische Untersuchungen der Akkommodation. A. v. Graefe's Arch. Ophthalmol. 152 S. 357 - 378, 1952
- MORGAN, M.W.
The resting state of accommodation.
Am. J. Optom. 34 S. 347 - 353, 1957
- MÜTZE, K.
Die Akkommodation des menschlichen Auges. Akademieverlag Berlin 1956
- NOVER, A. und GROTE, W.
Über die Bestimmung der Achsenlänge des menschlichen Auges. A. v. Graefe's Arch. Ophthalmol. 168 S. 405, 1965
- OLMSTEAD, J.M.
The role of autonomic nervous system in accommodation for far and near vision. J. Nervous. Mental. Disease 99 S. 794 - 798, 1944
- PITTS, D.G.
Electrical stimulation on the oculomotor nucleus: a theory of the central control of accommodation.
Am. J. Optom. 45 S. 709 - 718, 1968

- REITNAUER, P.G. Zeitverhältnisse der Akkommodation
des menschlichen Auges und ihre
Veränderungen unter experimentellen
Ermüdungsbedingungen. Z. Psychol.
161, S. 107, 152, 1957
- ROHEN, J.W. Morphologie des Akkommodationsappa-
rates in: Velhagen, Karl Der Augen-
arzt. Leipzig 1969
- SACHSENWEGER, P. Pathologie und Klinik der Refraktions-
anomalien. Die Akkommodation und
ihre Störungen. In: Velhagen, Karl
Der Augenarzt, 1969
- SCHÖBER, H.A.W., DEHLER, H. und KASSEL, R.
Accommodation during observations with
optical instruments. J. Opt. Soc. Am.
60 S. 103 - 107, 1970
- SCHÖBER, H.A.W. Die Nachtmyopie und ihre Ursachen
A. v. Graefe's Arch. Ophthal. 148
171, 1948
- SLOAN, L.L. Measurements of visual acuity. Arch.
Ophthal. (N.Y.) 45: S. 704 - 725, 1951
- STEINDORFF, P. nach Sachsenweger, P. in : Velhagen,
Karl. Der Augenarzt Leipzig 1969
- TOATES, F.M. Accommodation function of the human
eye. Physiol. Reviews Vol. 52, 1, 1972

- TROELSTRA, A. Accommodative tracking: a trial and error function. Vision Res. 4: S. 585 - 594, 1964
- WESTHEIMER, G. Accommodation measurement in empty visual fields. Journ.Opt. Soc. Am. Vol. 47 p. 714, 1957

LEBENS LAUF

geboren: am 2.10.51 in Burgau

Vater: Herbert Schneller, Ltd. Angestellter

Mutter: Margarethe Schneller, Hausfrau

Volksschule: 1958 - 1962 in Augsburg

Gymnasium: 1962 - 1971 Besuch des Dossen-
berger - Gymnasiums
in Günzburg
1971 Abitur
1971 - 1972 Zivildienst

Studium: 1972 - 1975 Studium der Literatur
und Geschichte an der
Ludwig Maximilians -
Universität München
1975 - 1981 Humanmedizin an der
Ludwig Maximilians -
Universität München
1976 Ärztliche Vorprüfung
1981 Ärztliche Prüfung und
Approbation

